

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การศึกษาผลกระทบอุณหภูมิต่อรูปพรรณในอตุมิเนียมหล่อทราย**



เลขหมู่.....**83172**  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....**๖ ส.ค. ๒๕๕๑**

b. **11960395**  
i. ....

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา ๒๕๕๐**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE INFLUENCE OF POURING TEMPERATURE ON  
POROSITY IN SAND CAST ALUMINIUM**



**MR. NATTHAPOL BUAKET  
MR. WORACHA LOONTONGTA**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การศึกษาผลกระทบอุณหภูมิเทตอร์พูนในอลูมิเนียม  
THE INFLUENCE OF POURING TEMPERATURE ON  
POROSITY IN SAND CAST ALUMINIUM

นักศึกษา

นายณัฐพล บัวเกต รหัสประจำตัวนักศึกษา 47010230  
นายวราวุธ ลุนทองทา รหัสประจำตัวนักศึกษา 47012324

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท



(รศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช)



(ดร. อนิรุท ไชยจรรวณิช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิเทต่อรุพรุณในออลุมิเนียมหล่อทราย
นักศึกษา	นายณัฐพล บัวเกตุ
หลักสูตร	นายวรชชา ลุนทองทา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2550
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญยานิพนธ์	รศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช ดร. อนิรุท ไชยจารุณนิช

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเทต่อรุพรุณที่เกิดขึ้นภายในออลุมิเนียมหล่อทราย ซึ่งมีลักษณะชิ้นงานเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดกว้าง 9 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร และหนา 2.5 เซนติเมตร โดยทำการหล่อชิ้นงานขึ้นมาด้วยวิธีหล่อทรายซึ่งหล่อที่อุณหภูมิเทที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่องเก็บข้อมูลและเทอร์โมคัปเปิลในการตรวจวัดอุณหภูมิ แล้วนำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อมารวเคราะห์หาขนาด เปรอร์เซ็นต์ และความหนาแน่นของรุพรุณที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ในการวิเคราะห์รุพรุณได้ใช้กล้องจุลทรรศน์และโปรแกรม Image Pro ได้ผลการทดลองออกมาว่าความหนาแน่นของรุพรุณไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเท แต่ขนาดรุพรุณที่ใหญ่ที่สุดและเปอร์เซ็นต์รุพรุณมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิเทที่เพิ่มสูงขึ้น จึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิเทมีผลต่อขนาดรุพรุณที่ใหญ่ที่สุดและเปอร์เซ็นต์รุพรุณที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

**Thesis Title** The Influence of Pouring Temperature on Porosity in Sand Cast Aluminium  
**Student** Mr. Natthapol Buaket  
Mr. Woracha Loontongta  
**Degree** Bachelor of Engineering in Industrial Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
**Academic Year** 2007  
**Thesis Advisor** Associate Prof. Pornsak Attavanich  
Dr. Anirut Chaijaruwanich

### ABSTRACT

This project was aimed to investigate the influence of pouring temperature on porosity appeared in sand cast aluminium, which was in a square shape with the dimension of 9 cm x 9cm x2.5 cm. The samples were prepared by sand casting, which were poured at different temperatures measured by thermocouple and data logger. After that, we have characterized them for size, percent and density of porosity in each sample. The microscope and Image Pro program were employed to characterize all samples. The results showed that the density of porosity was not changed with the different pouring temperature, however, the maximum pore size and percent of porosity tended to increase as the increase of pouring temperature. It can be concluded that the pouring temperature influenced on the maximum pore size and percent of porosity in the sand cast aluminium.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการศึกษาผลกระทบอุณหภูมิต่อรูพรุนในอลูมิเนียมหล่อทรายสามารถสำเร็จลงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. พรศักดิ์ อรรณวนิช และ ดร. อนิรุท ไชยจาวณิช สำหรับคำปรึกษาตั้งแต่เริ่มต้น โครงการจนถึงการตรวจรูปเล่มปริญญานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัว ที่มีส่วนช่วยผลักดันผู้จัดทำให้ได้รับโอกาสในการศึกษาที่ตลอดมา รวมถึงกำลังใจและความหวังดีที่มีให้ผู้จัดทำเสมอ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆ รวมถึงประสบการณ์ดีๆ ตลอดระยะเวลาที่ได้มาศึกษา ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่และน้องๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนทำให้โครงการนี้สำเร็จลงลงไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำ

นายณัฐพล

บัวเกตู

นายวรชา

สุนทองทา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท.....	1
1.3 ขอบเขตปริญญาโท.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 การหลอมโลหะ.....	2
2.1.1 เตาหลอมกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	2
2.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิหลอมและเวลาหลอม.....	3
2.2 คุณสมบัติของอลูมิเนียม.....	3
2.3 ก๊าซไฮโดรเจนในอลูมิเนียม.....	4
2.3.1 การวัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ละลายปนในน้ำโลหะอลูมิเนียม.....	5
2.3.2 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะอลูมิเนียม.....	5
2.4 กลไกการเกิดรูพรุน.....	6
2.4.1 รูพรุนที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจน.....	6
2.4.2 รูพรุนที่เกิดจากการหดตัว.....	6
2.4.3 ผลกระทบของการเกิดรูพรุน.....	6
2.5 การหล่อ.....	7
2.5.1 ประเภททราย.....	7
2.5.2 การออกแบบแม่พิมพ์.....	9
2.6 ความบกพร่องที่มักเกิดในการหล่อทราย.....	10
2.6.1 ความบกพร่องที่มีลักษณะเป็นรูพรุน.....	11
2.7 การแข็งตัว.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.1 การหัดตัว .....	13
2.8 การเทน้ำโลหะเหลว.....	13
2.9 ความสามารถในการไหล .....	14
<b>บทที่ 3 การดำเนินงานทดลอง</b>	
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	16
3.2 วิธีการทดลอง.....	19
3.3 สมการที่ใช้ในการคำนวณ.....	23
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน</b>	
4.1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 713 องศาเซลเซียส.....	24
4.2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส.....	26
4.3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 745 องศาเซลเซียส.....	28
4.4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 772 องศาเซลเซียส.....	30
4.5 ผลกระทบอุณหภูมิต่อรูพรุน.....	31
4.5.1 การกระจายตัวของรูพรุน.....	31
4.5.2 ความหนาแน่นต่อพื้นที่รูพรุน.....	32
4.5.3 ขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุด.....	33
4.5.4 เปอร์เซ็นต์รูพรุน.....	33
<b>บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน</b>	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	35
5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการดำเนินงาน.....	35
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	35
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>36</b>
<b>ภาคผนวก</b>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

## หน้า

รูปที่ 2.1 เตาหลอมกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบ Coreless.....	3
รูปที่ 2.2 รูปพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน.....	4
รูปที่ 2.3 การเกิดรูปพรุนที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น (เรียงจากบน-ล่าง).....	6
รูปที่ 2.4 แม่พิมพ์แบบเปิด (a) แม่พิมพ์แบบปิด (b).....	9
รูปที่ 2.5 ชนิดของความบกพร่องชนิดต่างๆ.....	11
รูปที่ 2.6 ความบกพร่องที่มีลักษณะเป็นรูปพรุน.....	11
รูปที่ 2.7 กราฟการเย็นตัวของโลหะบริสุทธิ์.....	12
รูปที่ 2.8 โครงสร้างชิ้นงานหล่อโลหะบริสุทธิ์.....	13
รูปที่ 2.9 การทดสอบความสามารถของการไหล.....	14
รูปที่ 3.1 เครื่องผสมทราย.....	16
รูปที่ 3.2 ชุดทำแบบหล่อทราย (a) หีบหล่อ (b) กระสวน.....	17
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์เสริมในการทำแบบหล่อทราย (a) เหล็กกระทงทราย (b) ซ้อนและท่อพีวีซี.....	17
รูปที่ 3.4 เตาหลอมโลหะและชุดควบคุม.....	18
รูปที่ 3.5 ชุดเก็บอุณหภูมิ (a) เทอโมคัมเปิด (b) เครื่องเก็บข้อมูล.....	18
รูปที่ 3.6 เครื่องฉีดผิวหน้าแบบละเอียด.....	19
รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์และคอมพิวเตอร์.....	19
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนในการทำแบบหล่อทราย.....	20
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนในการหลอมอลูมิเนียมและการเทน้ำโลหะ.....	21
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์รูปพรุน.....	22
รูปที่ 3.11 นำชิ้นงานทดสอบ ไปส่งด้วยกล้องจุลทรรศน์และวิเคราะห์รูปพรุน.....	22
รูปที่ 4.1 รูปพรุนที่เกิดในชิ้นงาน T713 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ.....	24
รูปที่ 4.2 รูปถ่ายรูปพรุนที่มีขนาดใหญ่จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T713.....	25
รูปที่ 4.3 ตัวรูปถ่ายรูปพรุนที่มีขนาดเล็กจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T713.....	25
รูปที่ 4.4 รูปพรุนที่เกิดในชิ้นงาน T730 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ.....	26
รูปที่ 4.5 รูปถ่ายรูปพรุนที่มีขนาดใหญ่จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T730.....	27
รูปที่ 4.6 รูปถ่ายรูปพรุนที่มีขนาดเล็กจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T730.....	27
รูปที่ 4.7 รูปพรุนที่เกิดในชิ้นงาน T745 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ.....	28
รูปที่ 4.8 รูปถ่ายรูปพรุนที่มีขนาดใหญ่จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T745.....	28
รูปที่ 4.9 รูปถ่ายรูปพรุนที่มีขนาดเล็กจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T745.....	29
รูปที่ 4.10 รูปพรุนที่เกิดในชิ้นงาน T772 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ.....	30
รูปที่ 4.11 รูปถ่ายรูปพรุนที่มีขนาดใหญ่จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T772.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.12 รูปถ่ายรูปพรที่มีขนาดเล็กจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T772.....	31
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการกระจายตัวของรูปพรที่อุณหภูมิต่างๆ.....	32
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูปพรที่อุณหภูมิต่างๆ .....	32
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบขนาดรูปพรที่ใหญ่ที่สุดเฉลี่ย 10 รู ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	33
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์รูปพร โดยพื้นที่ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณ ไฮโดรเจนในอลูมิเนียมที่แปรผันต่ออุณหภูมิ.....5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันประเทศไทยกำลังพัฒนาในด้านงานอุตสาหกรรม งานหล่อขึ้นรูปอลูมิเนียมเป็นการผลิตรูปแบบหนึ่งที่มีการใช้งานมากในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากงานหล่อสามารถทำได้ง่าย สะดวก และค่าใช้จ่ายไม่สูงเกินไป และเป็นสิ่งสำคัญมากถ้าสามารถผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพออกมาได้ และสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คุณภาพของชิ้นงานลดลงคือการเกิดรูพรุนของชิ้นงานเพราะยังมีรูพรุนมากชิ้นงานก็จะมีคุณภาพลดลงตามไปด้วย ซึ่งการทดลองในครั้งนี้เมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ก็จะสามารถช่วยให้คุณภาพของชิ้นงานนั้นดีขึ้น

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการนำอลูมิเนียมมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย จึงได้สังเกตเห็นว่าคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากการผลิตนั้นควรที่จะมีคุณภาพที่ดีมากเหมาะกับการใช้งาน จึงมีแนวคิดที่จะนำความรู้ในด้านวัสดุวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ในการที่จะผลิตชิ้นงานที่ได้จากการหล่ออลูมิเนียม เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพเหมาะกับการใช้งาน โดยเลือกแม่แบบหล่อทรายเนื่องจากการหล่อทรายเป็นการหล่อที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย และยังมีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ดังนั้นการหล่อทรายจึงเหมาะสมกับการศึกษามากที่สุด

### 1.2 วัตถุประสงค์ของปริิณญานิพนธ์

เพื่อศึกษาผลกระทบอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

### 1.3 ขอบเขตปริิณญานิพนธ์

- 1 อลูมิเนียมหล่อด้วยแบบหล่อทราย
- 2 ศึกษาเฉพาะขนาดและเปอร์เซ็นต์ของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน
- 3 ลักษณะชิ้นงานเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด กว้าง 9 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร และหนา 2.5

เซนติเมตร

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 ได้ทราบอุณหภูมิที่เหมาะสมและได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ
- 2 ได้เรียนรู้กระบวนการหล่ออลูมิเนียมด้วยแบบหล่อทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การหลอมโลหะ

การผลิตงานโลหะหล่อให้ได้ขนาดตามต้องการและมีคุณภาพดีนั้น จำเป็นจะต้องควบคุมตัวแปรสำคัญหลักสามอย่าง คือ การควบคุมการหลอม การควบคุมสภาพแบบหล่อโลหะ และส่วนผสมของโลหะกับอุณหภูมิโลหะมีผลอย่างไรต่อคุณภาพงานหล่อ ทั้งนี้เพื่อให้ได้น้ำโลหะที่ถูกต้องทั้งในส่วนผสมเคมีและอุณหภูมิน้ำโลหะ

การหลอมโลหะไม่ใช่เป็นเพียงการให้ความร้อนกับก้อนโลหะเพื่อทำให้โลหะหลอมละลายเท่านั้น การหลอมจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของเนื้อโลหะหลังการแข็งตัว ความแข็งแรงของเนื้อโลหะหลังการแข็งตัวและในการที่จะหลอมอลูมิเนียมนั้นก็ควรที่จะศึกษาคุณสมบัติของอลูมิเนียมให้ละเอียดเพื่อนำมาประกอบในการทำการหลอมอลูมิเนียม

##### 2.1.1 เตาหลอมกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เตาหลอมกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electric induction furnace) อยู่ 2 แบบคือ 1 coreless 2 channel แบบเตาที่ใช้ในงานนี้คือ coreless induction furnace ซึ่งมีลักษณะคล้ายหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีเพียงขดลวดปฐมภูมิเพียงขดเดียว เนื้อโลหะบรรจุลงในเตาจะกลายเป็นขดลวดทุติยภูมิ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในก้อนโลหะเกิดความร้อนขึ้นในโลหะหรือเป็นผลมาจาก eddy current ที่เกิดจากความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อโลหะที่เกิดจากการเหนี่ยวนำดังกล่าว ปริมาณ eddy current จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของกระแสไฟฟ้าระหว่าง (200-3000 Hz) ที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดปฐมภูมิ ทำให้เราชนิดนี้สามารถทำการหลอมได้ทั้งเศษและก้อนโลหะโดยความถี่กระแสไฟฟ้าที่สูงมากขึ้นจะทำให้สามารถหลอมเศษโลหะที่ยังบางลงได้ง่ายขึ้น ในขณะที่ความถี่กระแสไฟฟ้าที่ยังต่ำลงมากเท่าไรการหลอมจะกระทำได้เฉพาะกับโลหะที่มีความหนามากขึ้นเท่านั้น

เตาหลอมกระแสเหนี่ยวนำแบบ coreless มีข้อดีดังนี้

1 ไม่จำเป็นต้องเริ่มต้นการหลอมด้วยการใช้น้ำโลหะจากเตาหลอมอื่น ทำให้เตาหลอมชนิดนี้สามารถเริ่มต้นจากอุณหภูมิต่ำได้

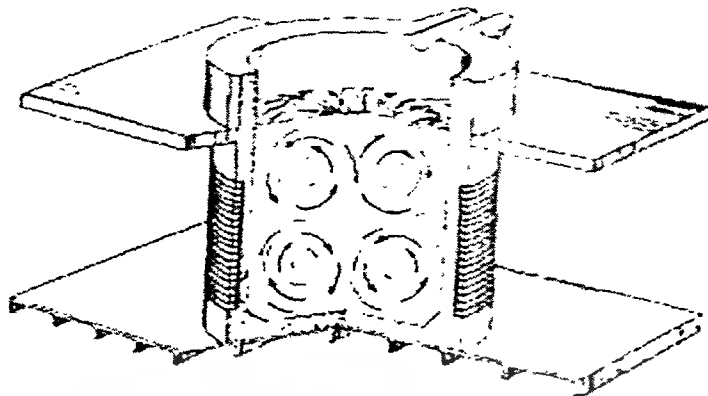
2 หลอมแล้วสามารถเทน้ำโลหะออกจากเตาจนหมดได้

3 สามารถตัดกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงๆเพื่อเทน้ำโลหะ

4 แบบ coreless จะมีการซ่อมบำรุงน้อยกว่า channel

การบำรุงรักษาเตาหลอมทำได้โดยหลังจากทำการหลอมสิ้นสุดลง ควรทำความสะอาดภายในเตาด้วยท่อนไม้หรือพายเหล็กโค้ง ในขณะที่ตัวเตายังมีอุณหภูมิสูงอยู่ การทำความสะอาดดังกล่าวจะทำการขูด dross และเศษโลหะที่เกาะติดผิวเตาออกไป จะไม่ให้เกิดความเสียหายกับตัวเตา อย่างไรก็ตามเวลาขูดเตาควรทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากการทำความสะอาดเตาควรจะทำในขณะที่เตายังร้อนแดงจัดอยู่ การกระทบกระแทกอย่างรุนแรงอาจจะทำให้เตาแตกเสียหายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 เตาหลอมกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แบบ Coreless

### 2.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิหลอมและเวลาหลอมแก่

ในระหว่างการเตรียมน้ำโลหะสำหรับงานหล่อสิ่งที่ต้องพึงระวังเสมอ คือจะต้องหลีกเลี่ยงการหลอมน้ำโลหะที่ระดับอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายมาก พร้อมทั้งหลีกเลี่ยงการการปล่อยเข่าน้ำ โลหะที่ระดับอุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลานานเกินความจำเป็น ทั้งนี้เพราะการหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายมากเป็นเวลานานมาก จะทำให้เนื้อโลหะชิ้นงานที่ได้มีเกรนหยาบ เนื้อโลหะจะมีคุณสมบัติทางกลต่ำมาก นอกจากนี้การหลอมโลหะที่ระดับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน จะมีผลทำให้น้ำโลหะละลายก๊าซชนิดต่างๆที่อยู่ในบรรยากาศเหนือน้ำโลหะในปริมาณมากขึ้น ซึ่งจะทำให้มีปัญหาด้านชิ้นงานหล่อที่เกิดจากก๊าซได้ง่ายขึ้น พร้อมๆกับการเกิดออกไซด์ (dross) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

## 2.2 คุณสมบัติของอลูมิเนียม

อลูมิเนียมในปัจจุบันเป็นโลหะที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ จักรยานยนต์ และอาจจะรวมไปถึงของใช้ต่างๆในชีวิตประจำวัน เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าอลูมิเนียมมีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตประจำวันมาก ทำให้เล็งเห็นว่าอลูมิเนียมที่ใช้ในควรมีคุณภาพดีและเหมาะกับการใช้งานในแต่ละประเภท เราจึงนำความรู้ในด้านวัสดุศาสตร์เพื่อมาศึกษาชิ้นงานหล่ออลูมิเนียมที่ผลิตขึ้นมาให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพดีและเหมาะกับการใช้งาน

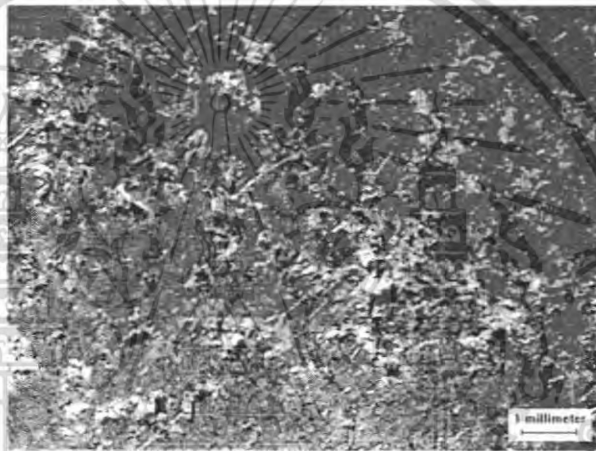
อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีอุณหภูมิหลอมละลายที่ 660 องศาเซลเซียส อลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เด่นอยู่หลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการใช้ทั่วไป มีค่าความหนาแน่นที่ต่ำกว่าเหล็กมาก มีความหนาแน่นเท่ากับ 2.7 กรัม/ซม<sup>3</sup> ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเหล็ก 7.8 กรัม/ซม<sup>3</sup> อลูมิเนียมจึงมีน้ำหนักเบากว่ามากข้อได้เปรียบนี้ จึงนำอลูมิเนียมมาใช้แทนเหล็กในอุตสาหกรรมรถยนต์ โดยในด้านชิ้นส่วนรถยนต์มีการเปลี่ยนจากการใช้เหล็กมาเป็นอลูมิเนียมแทนทำให้ตัวรถมีน้ำหนักเบาขึ้น จึงประหยัดเชื้อเพลิงขึ้น นอกจากนี้การตัดแต่งอลูมิเนียมโดยเครื่องมือกลกระทำได้ง่ายกว่าเหล็ก อลูมิเนียมไม่มีพิษ จึงมักนิยมทำภาชนะต่างๆ ส่วนข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับเหล็ก เช่น มีราคาสูงกว่า ไม่ทนต่อการขัดสี (abrasion) และการสึกหรอเท่าเหล็ก เป็นต้น ปริมาณความร้อนหลอมละลายมีค่า (92.7 แคลอรี/กรัม) ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น (0.226 แคลอรี/กรัม) ที่การเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะจากของเหลว-แข็งจะทำให้ปริมาตรลดลง 6.5-8.5% ของปริมาตรเดิม อุณหภูมิยิ่งสูงอุณหภูมิเย็นจะยิ่งมีความรวดเร็วในการจับตัวกับออกซิเจนกลายเป็นออกไซด์ เกิดขึ้นกับอุณหภูมิได้เพิ่มขึ้น

### 2.3 ก๊าซไฮโดรเจนในอลูมิเนียม

การผลิตชิ้นงานในงานหล่อให้มีคุณภาพดีนั้น ควรจะควบคุมกระบวนการผลิตชิ้นงานที่ผลิตขึ้นให้มีประสิทธิภาพและให้เกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งการเกิดก๊าซในน้ำโลหะอลูมิเนียมจัดเป็นองค์ประกอบหลักที่มีผล กระทบกับคุณภาพของชิ้นงานหล่ออลูมิเนียมมากที่สุดองค์ประกอบหนึ่ง กรณีที่ก๊าซละลายปนในน้ำโลหะปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อโลหะหลังการแข็งตัวจะไม่แสดงตำหนิประเภทรูพรุนให้เห็นเลย ในทางตรงข้ามถ้าปริมาณก๊าซที่ละลายปนในน้ำโลหะมีปริมาณมากพอจะทำให้เกิดตำหนิบนชิ้นงานหล่อ จะเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ใต้ผิวหนังหรือทั่วทั้งก้อนของเนื้อชิ้นงานเรียก Pinhole เพราะยังเกิดรูพรุนกับชิ้นงานมากขึ้นเท่าไรหรือความแข็งแรงของชิ้นงานก็จะน้อยลงเท่านั้น



รูปที่ 2.2 รูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

ก๊าซที่นำมาพิจารณาในงานหล่อโลหะอลูมิเนียมผสมเพียงอย่างเดียว คือก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งสามารถละลายได้ดีในน้ำโลหะ แต่ละลายได้น้อยมากในก้อนเนื้อโลหะ ดังนั้นเมื่อน้ำโลหะแข็งตัวไฮโดรเจนจะถูกขับออกจากเนื้อโลหะและทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อโลหะหลังจากการแข็งตัว แหล่งต้นกำเนิดของไฮโดรเจนในการหลอมอลูมิเนียมส่วนมากจะมาจากน้ำและความชื้นรวมทั้งไอน้ำที่ติดปนกับก้อนโลหะหรืออุปกรณ์ เครื่องมือที่มีความชื้นเกาะติด ตอนเทน้ำโลหะจากการที่อลูมิเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่ายมาก น้ำโลหะ อลูมิเนียมจึงทำปฏิกิริยากับไอน้ำกลายเป็นอลูมิเนียมออกไซด์และแยกอะตอมของไฮโดรเจนออกมาเรียกว่า Nascent hydrogen อาจเขียนสมการที่เกิดขึ้นได้ดังสมการนี้  $2Al + 3H_2O \rightarrow 6H + Al_2O_3$  ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนดังกล่าวจะละลายปนอยู่ในน้ำโลหะได้ในปริมาณมาก ส่วนไฮโดรเจนที่อยู่ในรูปของก๊าซหรือโมเลกุลจะไม่สามารถละลายปนอยู่ในน้ำโลหะอลูมิเนียมได้เลย การละลายของ Nascent hydrogen ดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้น้อยมากที่ระดับอุณหภูมิหลอมละลาย แต่ปริมาณการละลายของไฮโดรเจนจะเกิดเพิ่มขึ้นอย่างมากและรวดเร็วเมื่อระดับอุณหภูมิสูงมากขึ้นจากอุณหภูมิหลอมละลาย ดังนั้นการหลอมอลูมิเนียมระดับอุณหภูมิสูงมาก เช่น 800 องศาเซลเซียส จะมีก๊าซไฮโดรเจนละลายอยู่ในน้ำโลหะในปริมาณที่สูงเมื่อเทียบกับ 660 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.1 ปริมาณไฮโดรเจนในอลูมิเนียมที่แปรผันต่ออุณหภูมิ

อุณหภูมิ °C	ปริมาณไฮโดรเจน c.c./100g Al
0	0.0000001
400	0.005
660 solidus	0.036
660 liquidus	0.6
700	0.92
750	1.29
800	1.67
850	2.15

ตารางที่ 2.1 แสดงความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนในอลูมิเนียม โดยวัดปริมาณไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในอลูมิเนียม 100 กรัม จากตารางจะเห็นว่าความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนจะเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ

### 2.3.1 การวัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ละลายปนในน้ำโลหะอลูมิเนียม

การวัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ละลายปนในน้ำโลหะจัดเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากในการปฏิบัติการหลอมโลหะอลูมิเนียม ทั้งนี้เพื่อให้การควบคุมคุณภาพของชิ้นงานให้ปราศจากตำหนิที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจน โดยจะทำการวัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะ เช่น การเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อทรายขึ้นที่ขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 50 มิลลิเมตร จากนั้นเทน้ำโลหะที่จะเทชิ้นงานลงในแม่แบบทดสอบดังกล่าวปล่อยให้ น้ำโลหะแข็งตัวจากนั้นให้สังเกตการหดตัวของน้ำโลหะว่าเกิดขึ้นหรือไม่ การจะประมาณการว่ามีก๊าซละลายปนในน้ำโลหะหรือไม่ จากนั้นจึงตัดแท่งทดสอบไปกลึงปอกผิวเพื่อสังเกตหารูพรุนที่เกิดขึ้นแบบ Pinhole ที่ฝังในเนื้อโลหะเป็นต้น

### 2.3.2 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะอลูมิเนียม

ในการหล่อชิ้นงานนั้นการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในชิ้นงานเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เพราะก๊าซไฮโดรเจนสามารถพบได้ทั่วไปไม่ว่าจะเป็นในควมชื้นในอากาศ ( $H_2O$ ) ไออน้ำที่ติดปะปนกับชิ้นงาน อุปกรณ์ต่างๆ และก๊าซไฮโดรเจนยังสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย สาเหตุหนึ่งที่เกิดรูพรุนภายในงานหล่อมาจากไฮโดรเจน ดังนั้นควรมีกระบวนการในการแก้ไขและป้องกันไม่ให้ก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นหรือกำจัดก๊าซออกจากน้ำโลหะก่อนการหลอม การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนในน้ำโลหะอลูมิเนียมสามารถทำได้ 3 วิธี

1 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ก๊าซคลอรีนหรือไนโตรเจน จะใช้ก๊าซคลอรีนหรือไนโตรเจนหรือก๊าซทั้ง 2 อย่างผสมกัน ฟันจากกันเบาให้เกิดฟองก๊าซลอยตัวผ่านน้ำโลหะขึ้นสู่บรรยากาศจะทำให้อะตอมของไฮโดรเจนหรือ Nascent hydrogen เกาะผิวฟองก๊าซออกสู่บรรยากาศ

2 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้สารประกอบเคมีที่มีชื่อเรียกว่า Hexachlorethane สารประกอบเคมีชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นผงบรรจุในซองอลูมิเนียมหรืออัดเป็นก้อน การกำจัดก๊าซด้วยสารประกอบชนิดนี้จะทำโดยการกดอัดให้สารประกอบจมลงก้นเบ้าหลอมโลหะ จากนั้นน้ำโลหะจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปลดปล่อยก๊าซคลอรีนออกมา และดึงก๊าซไฮโดรเจนออกจากน้ำโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ระบบสุญญากาศ เป็นวิธีที่มีต้นทุนสูงมากและมีการใช้งานน้อยมาก คือ การใช้ระบบสุญญากาศ โดยจะนำเข้าหลอมอลูมิเนียมทั้งเบ้าใส่เข้าไปในห้องสุญญากาศ มีค่าใช้จ่ายค่าสูง แต่วิธีที่ได้ผลดีมากที่สุด

## 2.4 กลไกการเกิดรูพรุน

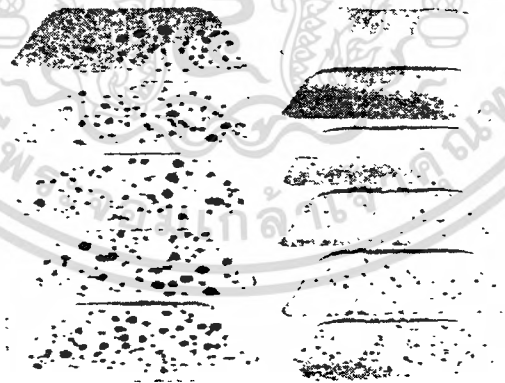
สาเหตุการเกิดรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานหล่ออาจแบ่งเป็น 2 ส่วน คือเกิดจากก๊าซที่ละลายอยู่ในโลหะหรือเกิดขึ้นจากลักษณะของการหดตัวของชิ้นงานหลังจากการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง และประเภทของรูพรุนอาจแบ่งได้ 2 ประเภทดังนี้

### 2.4.1 รูพรุนที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจน

รูพรุนที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจน สาเหตุเกิดจาก ความสามารถในการละลายไฮโดรเจน (H) ของโลหะในสถานะของเหลวดีกว่าของแข็งและเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ระหว่างการแข็งตัวของโลหะที่แข็งตัวแล้วจะขับไฮโดรเจนอะตอมเดี่ยวออกสู่น้ำโลหะ ไฮโดรเจนนี้จะจับตัวกันเป็น โมเลกุลหรือก๊าซ ( $H_2$ ) และทำให้เกิดรูพรุนที่ชิ้นงาน ซึ่งรูพรุนที่เกิดจากก๊าซจะมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีขนาดเล็ก

### 2.4.2 รูพรุนที่เกิดจากการหดตัว

รูพรุนอีกประเภทเกิดจากการหดตัว ซึ่งมีสาเหตุเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างของแข็งกับของเหลว ระหว่างการแข็งตัวจะเกิดการหดตัว เมื่อโลหะแข็งตัวจากด้านนอกเข้ามาข้างใน จนเกรนขยายแล้วชนกัน จะเกิดเป็นช่องว่างระหว่างเกรน ช่องว่างนั้นกลายเป็นรูพรุน ซึ่งรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวจะมีลักษณะ มีรูปร่างไม่แน่นอน ขนาดรูพรุนประเภทนี้ส่วนใหญ่จะมีขนาดใหญ่



รูปที่ 2.3 การเกิดรูพรุนที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น (เรียงจากบน-ล่าง)

### 2.4.3 ผลกระทบของการเกิดรูพรุน

ผลกระทบของรูพรุนที่เกิดขึ้นต่อคุณสมบัติทางกลอาจทำให้ชิ้นงานนั้นมีคุณภาพลดลง หรือคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานด้อยลง เช่น ผิวชิ้นงานที่ได้ อาจมีความหยาบมากกว่าที่ควรจะเป็น ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลกระทบของการเกิดรูพรุนที่เกิดขึ้นมีความสำคัญมากในการหล่อชิ้นงาน ดังนั้นถ้าอยากได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพควรที่จะหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงาน หรือให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด

## 2.5 การหล่อ

การหล่อทรายเป็นกระบวนการหล่อชิ้นงานชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมใช้งานมากที่สุดในบรรดาการหล่อทั้งหลายและยังสามารถหล่อโลหะได้เกือบทุกชนิด การหล่อทรายยังสามารถใช้หล่อโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงได้ เช่น ไทเทเนียม เหล็กกล้า นิกิล เมื่อเทโลหะเหลวลงในแม่แบบและชิ้นงานแข็งตัวอย่างสมบูรณ์แล้ว แม่แบบทรายจะถูกทำลายเพื่อนำชิ้นงานหล่อออกมา หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงาน ไปผ่านกระบวนการอื่นๆ เช่น การทำความสะอาด ตัด ขัด เป็นต้น แต่การหล่อทรายอาจมีข้อด้อย คือ ผิวชิ้นงานที่ได้ อาจไม่มีคุณภาพดีมากนักเมื่อเทียบกับกระบวนการหล่อชนิดอื่น และเกิดความบกพร่อง (defects) ขึ้นภายในชิ้นงาน

### 2.5.1 ประเภททราย

ทรายหล่อ ทรายหล่อส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยทรายผสมกับดินเหนียว ซึ่งดินเหนียวที่นิยมใช้กันคือ เบนโทไนต์ ทรายหล่อดีมีสมบัติดังนี้ ทรายที่สามารถทนความร้อนสูงๆ ได้ ทำให้เป็ยกหรือหดได้ง่าย มีการอัดตัวแน่นพอดี ไม่เกิดการร่วนตัวง่าย ปั้นเป็นรูปต่างๆ ได้ง่าย มีอายุยืนยาว ด้านทานค่อน้ำหนักของโลหะได้ดี มีอัตราลมผ่านดี มีปริมาณของน้ำพอดี เมื่อปั๊มจะไม่ร่วนและผิวหน้าของรอยที่หักจะต้องเรียบยังดี

ทรายหล่อ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

#### 1) ทรายธรรมชาติ

ทรายธรรมชาตินั้นโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย ทรายซิลิกาผสมกับดินเหนียว (clay) ชนิดอลูมิเนียมซิลิเกต โดยเป็นไปตามธรรมชาติ (weathering) จึงเหมาะแก่การทำแบบหล่อแบบเหล็กหล่อและโลหะที่ไม่ใช่เหล็กบางชนิด ในทรายธรรมชาติเราจะพบสารอินทรีย์บางชนิดอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะช่วยป้องกันทรายในกรณีเทน้ำโลหะร้อนๆ จึงเหมาะแก่การนำไปใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงๆ ได้เป็นอย่างดี ทรายธรรมชาติหาได้จากขุดมาแล้วทำการแยกซากพืช ราก ไม้ ใบ ไม้ ออกให้หมดแล้วทำการเติมน้ำผสมลงไป ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ก็สามารถนำไปใช้ทำแบบหล่อ ได้ทันที

ข้อดีทรายธรรมชาติ

- 1 เม็ดทรายมีขนาดสม่ำเสมอ
- 2 อัดตัวได้ดีในแบบหล่อ
- 3 ไม่แยกตัวในขณะขนย้ายหีบหล่อ
- 4 ทำงานในช่วงความชื้นปกติ (4-8%) ได้ดี
- 5 ใช้งานได้ง่าย การควบคุมคุณภาพไม่จำเป็นมากนัก

6 หมดปัญหาการแห้งเร็ว

ข้อด้อยทรายธรรมชาติ

- 1 ปริมาณความชื้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศรอบข้าง
- 2 มักจะมีราก ไม้ ซากพืช ซากสัตว์ ปะปนอยู่มาก
- 3 มีปริมาณดินเหนียวมากเกินไป
- 4 ควบคุมส่วนผสมลำบากมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 ต้องนำไปผสมกับทรายเก่าๆจึงใช้งานได้

6 ถ้าตาหรือกระทุ้งแบบแน่นเกินไป จะมีปัญหาเวลาเทน้ำโลหะ

2) ทรายวิทยาศาสตร์

เป็นทรายที่ได้จากการรวมของทรายที่มีรูปร่างมุมแหลมคมและถูกชะล้างให้สะอาดแล้วนำมาผสมกับดินเหนียวเข้ากันในอัตราส่วน 5% และควรให้มีความชื้นในปริมาณที่น้อยกว่า 5% ซึ่งจะช่วยให้ทรายมีการเกาะยึดกันแข็งแรงพอดี ทรายวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่จะเป็นทรายซิลิกา ทรายเซอร์คอน ทรายโอลิวีน และทรายโครไมต์ แล้วนำมาผสมกับตัวประสาน น้ำ และสารเติมพิเศษต่างๆ ตัวประสานสำหรับทรายวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ เบนโทไนต์ ข้อดีทรายวิทยาศาสตร์

1 อายุการใช้งานนานกว่าทรายธรรมชาติ

2 อัตราลมผ่านดีกว่าทรายธรรมชาติ

3 มีก๊าซอยู่น้อย เนื่องจากวัตถุดิบที่บริสุทธิ์เป็นตัวประสาน

4 ปริมาณน้ำพอดิ ต่ำกว่าทรายธรรมชาติ

5 สามารถตำหรือกระทุ้งแบบได้แน่นกว่าทรายธรรมชาติลดปัญหาการเทน้ำโลหะลงแบบ

6 มีอายุยืนยาวกว่าทรายธรรมชาติ

7 ควบคุมคุณภาพได้ง่าย

8 คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสม

ข้อดีของทรายวิทยาศาสตร์

1 แข็งเร็วเมื่อทุ้งแบบไว้

2 ขอบเขตน้ำพอดิ จึงเป็นสาเหตุให้ทิ้งไว้นานก็ไม่ได้

3 ต้องใช้น้ำสะอาดผสมเท่านั้น

4 ใช้เครื่องทำการผสมทรายให้เข้ากัน

5 ต้องมีอัตราส่วนส่วนในการผสมที่แน่นอน

6 ต้องใช้ความรู้ และความชำนาญในการตรวจสอบเม็ดทราย

ลักษณะของเม็ดทรายที่ใช้ในการทำแม่แบบ

1 ขนาดของเม็ดทราย (Grain size) การใช้เม็ดทรายเล็กจะได้แม่แบบที่มีผิวเรียบ ในขณะที่การใช้เม็ดทรายใหญ่ จะให้การถ่ายเทของก๊าซผ่านผนังแม่แบบได้ดีกว่า

2 รูปร่างของเม็ดทราย (Grain shape) ถ้าทรายที่ใช้มีรูปร่างที่ทำให้ทำให้เกาะกันได้ดีจะทำให้ได้แม่แบบที่แข็งแรงเนื่องจากการเกาะกันของเม็ดทราย แต่ขณะเดียวกันการเกาะกันที่ดีจะทำได้ความสามารถในการถ่ายเทของก๊าซผ่านผนังแม่แบบลดลง

3 การกระจายตัวของเม็ดทราย (Grain size distribution) ในการทำแม่แบบควรจะทำให้เม็ดทรายที่ใช้มีการกระจายตัวของเม็ดทรายอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ได้แม่แบบที่มีคุณสมบัติต่างๆอย่างสม่ำเสมอทั้งแบบออกมา

ในการทำแม่แบบทรายจำเป็นต้องใช้ตัวประสาน (Bonding agents) ผสมกับน้ำช่วยยึดเม็ดทรายเข้าด้วยกันซึ่งตัวประสานที่ใช้กันก็มีหลายชนิด เช่น โคลน (Bonding clay) ตัวประสานอินทรีย์ (Organic binders) เช่น Phenolic resins หรือ ตัวประสานอนินทรีย์ (Inorganic binders) เช่น Sodium silicate และ phosphate นอกจากนี้อาจมีการเติมสารเคมีบางชนิด ลงไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงหรือความสามารถในการระบายก๊าซของแบบทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของแม่แบบทรายมีหลายชนิดแต่ละชนิดก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ซึ่งเวลาใช้งานก็ควรจะต้องเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ เช่น Green sand molds เป็นแม่แบบที่มีราคาถูกที่สุด จึงประหยัดต้นทุนการผลิต แต่ชิ้นงานที่ได้ก็มักมีคุณภาพไม่ค่อยดีนัก เป็นต้น และแม่แบบที่นำมาใช้ในการทดลองก็เป็นชนิด Green sand molds

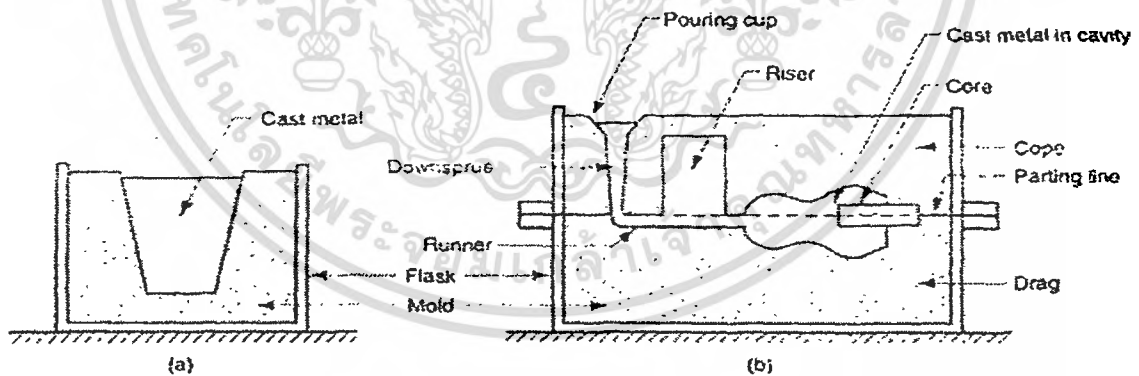
Green sand molds ทำมาจากการที่นำทรายมาผสม ซิลิกา น้ำ dextrin เป็นแม่แบบที่มีราคาถูกที่สุด สาเหตุที่เรียก Green ก็เนื่องจากทรายชนิดนี้มีความชื้นหรือน้ำผสมอยู่ อย่างไรก็ตามความแข็งแรง ของแม่แบบชนิดนี้ก็ยังมีมากพอใช้ในการหล่อชิ้นงานชนิดต่างๆได้ นอกจากนี้แม่แบบชนิดนี้ก็มักมีคุณสมบัติที่ดีในเรื่องอื่นๆอีก เช่น ความสามารถในการยุบตัว ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ ความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ แม่แบบชนิดนี้มีราคาถูกที่สุดในบรรดาแม่แบบทั้งหลายและเป็นที่ยอมรับมากที่สุดเช่นกัน แต่เนื่องจากแม่แบบชนิดนี้จะมีน้ำและความชื้นผสมอยู่จึงอาจก่อให้เกิดความบวมพอง ขึ้นในชิ้นงานหล่อได้

### 2.5.2 การออกแบบแม่พิมพ์

เครื่องมือพื้นฐานในการหล่อ คือ แม่พิมพ์ ซึ่งจะประกอบด้วยช่องว่างภายใน (Cavity) ที่มีรูปร่างที่ใช้ในการกำหนดรูปร่างของชิ้นงานหล่อ ขนาดและรูปร่างของแม่พิมพ์จะออกแบบเพื่อการหดตัวของโลหะที่เกิดขึ้นขณะแข็งตัวและเย็นตัวลง แม่พิมพ์สามารถที่จะผลิตมาได้จากวัสดุหลายชนิดด้วยกัน เช่น ทราย ปูนปลาสเตอร์ เซรามิกส์ และโลหะ แม่พิมพ์สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ด้วยกัน

1 แม่พิมพ์แบบเปิด (Open mold) (แสดงดังรูปที่ 2.4 (a)) สำหรับแม่พิมพ์ชนิดนี้โลหะเหลวจะถูกเทลงไปโดยตรงในช่องว่างภายในแม่แบบ รูปร่างของแม่พิมพ์จะไม่ซับซ้อนมาก

2 แม่พิมพ์แบบปิด (Closed mold) (แสดงดังรูปที่ 2.4 (b)) โลหะเหลวจะถูกเทจากภายนอกผ่านทางเดินที่เรียกว่า Gating system ก่อนที่จะไหลสู่ช่องว่างภายในแม่แบบ โดยที่ Gating system ใช้สำหรับควบคุมการไหลของโลหะเหลว แม่พิมพ์ชนิดนี้มีความสำคัญต่องานหล่อมามากกว่าแม่แบบชนิดแรก



รูปที่ 2.4 ลักษณะแม่พิมพ์แบบเปิด (a) แม่พิมพ์แบบปิด (b)

การออกแบบแม่พิมพ์ควรจะต้องให้ความสำคัญกับการออกแบบชิ้นงานด้วย เพราะถ้าชิ้นงานมีความซับซ้อนน้อยจะทำแม่พิมพ์ขึ้นมาค่อนข้างง่ายและได้คุณสมบัติที่ต้องการ เช่น อาจจะออกแบบเป็นรูปเรขาคณิตเพื่อทำให้ง่ายขึ้นในการออกแบบ หลีกเลี่ยงการออกแบบชิ้นงานให้เป็นมุมแหลม เนื่องจากจะมีการสะสมความเค้นและอาจทำให้เกิดการแตกร้าวของชิ้นงานได้ แต่ควรจะใช้ส่วนโค้งแทน การออกแบบชิ้นงานให้มีความหนาสม่ำเสมอเพื่อลดโอกาสการเกิดโพรงภายในชิ้นงานเนื่องจากการหดตัวซึ่งความบวมพองชนิดนี้มีโอกาสเกิดมากขึ้นถ้าชิ้นงานมีความหนาแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นต้น แม่แบบควรมีลักษณะเอียง (taper หรือ draft) เล็กน้อยเพื่อให้ถอดกระสวยออกจากแม่แบบได้ง่าย เอียงประมาณ 1-3 องศา แม่พิมพ์ควรมีลักษณะที่สมบูรณ์ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ใส่แบบ เนื่องจากมีโอกาสทำให้เกิดความบกพร่องในชิ้นงานได้ง่าย การเลือกวิธีการหล่อให้เหมาะสมก็จะทำให้แม่พิมพ์สามารถผลิตชิ้นงานที่ดีและเหมาะสมได้ เนื่องจากวิธีการหล่อแต่ละวิธีมีคุณลักษณะที่แตกต่างกันทั้งในเรื่องของความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (tolerances) และคุณภาพของผิวชิ้นงาน ในการหล่อบางวิธีควรออกแบบแม่พิมพ์เพื่อไว้เพื่อเป็นระยะการในตกแต่งชิ้นงาน (machining allowances) เช่น การหล่อโดยใช้แม่แบบทรายควรมีระยะเผื่อการตัดแต่ง 0.16 ถึง 0.63 เซนติเมตร เช่น ในการออกแบบแม่พิมพ์ที่ผลิตชิ้นงานสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 4 เซนติเมตร ควรออกแบบแม่พิมพ์ขนาด 4.16 ถึง 4.63 เซนติเมตร เพื่อเป็นระยะการตกแต่งชิ้นงาน เป็นต้น

การพิจารณาคุณภาพในการทำแม่แบบในการหล่อทราย

- 1 จะต้องทนความร้อนได้สูงโดยไม่เกิดการหลอมละลาย หรือเสื่อมสภาพ
- 2 ความแข็งแรง (Strength) แม่แบบในการหล่อทรายที่ดีจะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะสามารถคงรูปได้ระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ต้องทนต่อสภาพในการสีก้อนที่จะเกิดขึ้นจากการไหลของโลหะเหลวด้วย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น รูปร่างของแม่ทราย ความสามารถในการยึดเหนี่ยวของตัวประสาน
- 3 ความสามารถในการยุบตัว (Collapsibility) เป็นความสามารถของแม่แบบในการอนุญาตให้ชิ้นงานได้โดยไม่ทำให้เกิดการแตกร้าวของชิ้นงาน โดยทั่วไปแล้วแม่แบบที่มีความแข็งแรงสูงจะมีความสามารถในการยุบตัวต่ำ นอกจากนี้ยังหมายถึง ความยากง่ายในการกำจัดทรายออกจากชิ้นงานระหว่างการทำความสะอาด
- 4 ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (Permeability) แม่แบบในการหล่อทรายจะต้องมีรูพรุนขนาดเล็กสำหรับให้ก๊าซ หรืออากาศอื่น ที่เกิดขึ้นระหว่างการหล่อซึมผ่านแม่แบบไปได้
- 5 ความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) เป็นความสามารถของทรายที่เป็นผิวภายในของแม่แบบในการต้านทานการแตกร้าวและการโก่งงอ (Buckling) เนื่องจากการสัมผัสกับโลหะเหลวที่อุณหภูมิสูง
- 6 ความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ (Reusability) แม่แบบทรายที่ดีควรที่จะสามารถนำทรายกลับมาใช้ใหม่ได้

## 2.6 ความบกพร่องที่มักเกิดในการหล่อทราย

การเกิดความบกพร่องของงานหล่อนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ แต่ละแบบมีลักษณะความบกพร่องที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน โดยมีสาเหตุแตกต่างกัน ซึ่งความบกพร่องที่เกิดขึ้นแบ่งได้ดังนี้

- 1 Sand blow (ดูรูปที่ 2.5 (a)) เป็นความบกพร่องที่มีลักษณะเป็นฟองอากาศซึ่งเกิดขึ้นมาจากก๊าซภายในแม่แบบโดยทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน สาเหตุเนื่องมาจากแม่แบบนี้ระบายก๊าซหรืออากาศได้ไม่ดีหรือทรายที่ใช้ทำแม่แบบมีความชื้นมากเกินไป
- 2 Pinhole เป็นความบกพร่องที่มีลักษณะเป็นฟองอากาศเล็กๆกระจายอยู่บริเวณผิวชิ้นงานหรือลึกลงไปเล็กน้อย เกิดขึ้นเนื่องจากก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างการเทโลหะเหลวเข้าไปในแม่แบบ แสดงดังรูปที่ 2.5 (b)
- 3 Sand wash เป็นความบกพร่องที่มีเนื้อโลหะส่วนเกินยื่นออกมาจากชิ้นงานหล่อ โดยสาเหตุเกิดจากการสีก้อนของแม่แบบทรายเนื่องจากการเทหรือการไหลของโลหะเกินไป แสดงในรูปที่ 2.5 (c)

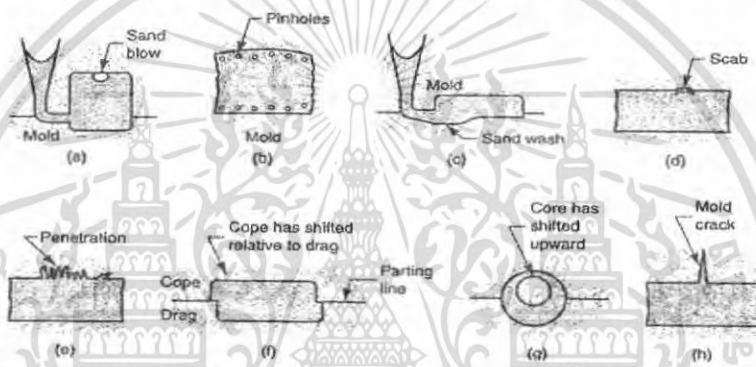
4 Penetration เป็นความบกพร่องที่เกิดจากโลหะเหลวมีความสามารถในการไหลมากเกินไป จึงแทรกตัวเข้าไปในแม่แบบหรือไส้แบบ เมื่อขึ้นงานแข็งตัวมีเนื้อโลหะส่วนเกินยื่นออกมาจากชิ้นงานหล่อและบริเวณผิวชิ้นงานมีทรายผสมอยู่ การอัดทรายให้แน่นขึ้นจะช่วยให้แน่นจะช่วยลดปัญหานี้ รูปที่ 2.5 (d)

5 Scabs เป็นความบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการที่มีทรายหลุดจากผิวแม่แบบเข้าไปพร้อมกับตัวชิ้นงานขณะที่ขึ้นงานเกิดการแข็งตัว ทำให้เกิดเป็นผิวที่มีลักษณะหยาบบนผิวชิ้นงาน รูปที่ 2.5 (e)

6 Mold shift เป็นความบกพร่องที่เกิดจากการเลื่อนของแม่แบบซีกใดซีกหนึ่งออกจากตำแหน่งที่ถูกต้องก่อนที่โลหะจะแข็งตัว ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได แรงลอยตัวอาจเป็นสาเหตุเกิด Mold shift รูปที่ 2.5 (f)

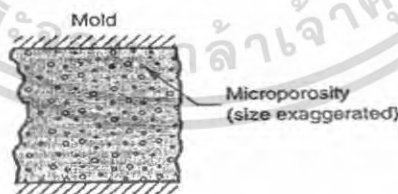
7 Mold crack เป็นความบกพร่องที่เกิดจากการโลหะเหลวมีความสามารถในการแทรกตัวเข้าไปในแม่แบบเนื่องจากการแตกของแม่แบบทำให้ได้ชิ้นงานที่เป็นครีบยื่นออกมา รูปที่ 2.5 (g)

8 Core shift เป็นความบกพร่องที่รูปร่างภายในของชิ้นงานผิดเพี้ยนไปจากความต้องการ เนื่องจากการเลื่อนของไส้แบบออกจากตำแหน่งที่ถูกต้องและแรงลอยตัวอาจเป็นสาเหตุเกิด Core shift รูปที่ 2.5 (h)



รูปที่ 2.5 ชนิดของความบกพร่องชนิดต่างๆ

9 Microporosity (แสดงดังรูปที่ 2.6) เป็นความบกพร่องที่มีลักษณะเป็นช่องว่างเล็กๆเกิดขึ้นกระจายอยู่ทั่วไปในชิ้นงาน โดยสาเหตุเกิดขึ้นมาจากการหดตัวเนื่องจากการแข็งตัวในบริเวณเล็กๆ (Localized solidification shrinkage) และมักเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการแข็งตัวช้าเกินไป



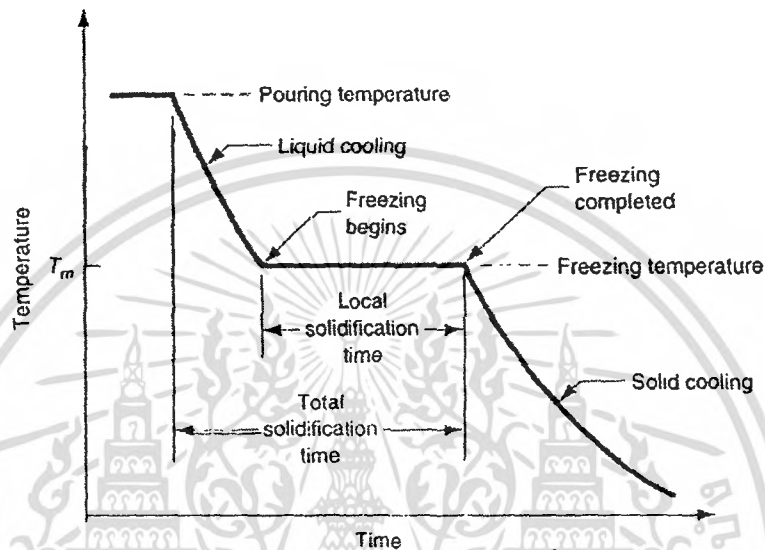
รูปที่ 2.6 ความบกพร่องที่มีลักษณะเป็นรูพรุน

## 2.7 การแข็งตัว

การแข็งตัวของโลหะ (solidification) เป็นปรากฏการณ์ที่โลหะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นของแข็งอีกครั้งหนึ่งเมื่ออุณหภูมิลดลง กระบวนการแข็งตัวของโลหะจะแตกต่างกันไปนั่นขึ้นอยู่กับว่าโลหะชนิดนั้นเป็นโลหะบริสุทธิ์หรือโลหะผสม (Alloy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

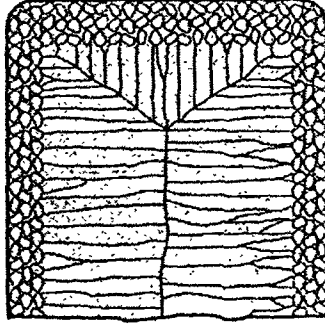
การแข็งตัวของ โลหะบริสุทธิ์ เกิดจากการแข็งตัวที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งก็คืออุณหภูมิที่เป็นจุดหลอมเหลวของ โลหะบริสุทธิ์ รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะเส้นกราฟของการเย็นตัว (Cooling curve) ของโลหะบริสุทธิ์ การแข็งตัวของ โลหะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิกงที่ ( $T_m$ ) และจะอาศัยระยะเวลาช่วงหนึ่งซึ่งเรียกว่า Local solidification time ซึ่งเป็นช่วงที่โลหะ ใช้ไปในการคายพลังงานความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent heat of fusion) ออกไปให้กับสิ่งแวดล้อม เวลาที่ใช้ ตั้งแต่การเทโลหะเหลวเข้าแม่แบบจนกระทั่ง โลหะเหลวเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์เรียก Total solidification time เมื่อ โลหะเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์แล้วการลดลงของอุณหภูมิก้จะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงการเย็นตัวของโลหะบริสุทธิ์

เนื่องจากอุณหภูมิของแม่แบบมีค่าต่ำทำให้ โลหะเหลวที่สัมผัสกับผิวแม่แบบเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นชั้นบางๆ ซึ่งชั้นบางๆนี้จะกลายเป็นเปลือกห่อหุ้ม โลหะเหลวไว้ข้างใน การแข็งตัวจะเกิดไปอย่างต่อเนื่องจาก ผิวภายนอกไล่เข้าไปสู่ศูนย์กลางของชิ้นงาน อัตราเร็วในการแข็งตัวขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นผ่าน แม่แบบรวมทั้งคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะ

โลหะที่ขึ้นที่ผนังแม่แบบเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากการสูญเสียความร้อนให้กับผนังแม่แบบ ทำให้ เกรนของโลหะที่เกิดขึ้นมีลักษณะเล็ก ละเอียด มีรูปร่างคล้ายทรงกลม (Equiaxed) และมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (randomly oriented) เมื่ออุณหภูมิลดลงต่อไปก็จะมีเกรนใหม่ๆเกิดเพิ่มขึ้นและเกิดขึ้นในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับทิศทาง ที่สูญเสียความร้อน เกรนที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะเกิดขึ้นในทิศทางที่ยื่นเข้าไปในศูนย์กลางของชิ้นงานและมีรูปร่างคล้ายเข็ม และเมื่อเกรนเหล่านี้เติบโตขึ้นจะแตกกิ่งออกมาเรื่อยๆในลักษณะตั้งฉากกับกิ่งที่มันแตกออกมา ลักษณะการเติบโตของ เกรนแบบนี้เรียกว่า Dendritic growth ซึ่งการเติบโตของเกรนในลักษณะนี้สามารถพบได้ระหว่างการแข็งตัวของโลหะ ผสมเช่นกัน โครงสร้างลักษณะคล้ายต้นไม้หรือที่เรียกว่า เคนไดรด์ นี้จะค่อยๆเจริญเติบโตไปเรื่อยๆจนเกิดการแข็งตัว ของโลหะอย่างสมบูรณ์ โดยปกติแล้วส่วนของโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่จะจัดเรียงตัวไปในทิศศูนย์กลางของชิ้นงานดัง รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างชิ้นงานหล่อโลหะบริสุทธิ์

### 2.7.1 การหดตัว

การหดตัว (Shrinkage) เนื่องจากการแข็งตัวมักจะเกิดขึ้นกับโลหะเกือบทุกชนิด เนื่องจากของแข็งมีความหนาแน่นมากกว่าของเหลว การเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งทำให้อัตราส่วนปริมาตรต่อน้ำหนักของโลหะลดลง

เมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานลดลง การหดตัวของชิ้นงานจะเกิดขึ้นซึ่งการหดของชิ้นงานจะเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน คือ (1) การหดตัวในสถานะของเหลวเนื่องจากอุณหภูมิที่ลดลง (2) การหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ซึ่งเรียกรวมการหดตัวเนื่องจากการการแข็งตัว (Solidification shrinkage) (3) การหดตัวของชิ้นงานเนื่องจากอุณหภูมิที่ลดลงหลังจากการกลายเป็นของแข็งแล้ว

## 2.8 การเทโลหะเหลว

การเทโลหะเหลวลงในแม่แบบจำเป็นต้องให้โลหะเหลวบรรจุลงในแม่แบบจนเต็มก่อนที่จะเกิดการแข็งตัว ปัจจัยที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการเทโลหะเหลวได้แก่ อุณหภูมิเท (Pouring Temperature) อัตราการเท (Pouring rate) ความปั่นป่วนของโลหะเหลว (Turbulence)

อุณหภูมิเท คือ อุณหภูมิของโลหะเหลวขณะเทลงไปในแม่แบบ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเทกับอุณหภูมิที่โลหะแข็งตัวซึ่งจะเรียกว่า Superheat ซึ่งจะเป็นปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกไปก่อนที่จะเกิดการแข็งตัวของโลหะ

อัตราการเท คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของโลหะเหลวที่ไหลเข้าไปในแม่แบบ ถ้าอัตราการเทต่ำเกินไปโลหะจะเกิดการแข็งตัวก่อนที่บรรจุได้เต็มแม่แบบ แต่ถ้าอัตราการเทสูงเกินไปความปั่นป่วนของโลหะเหลวจะเกิดขึ้นมากและทำให้เกิดปัญหาต่างๆในการหล่อ

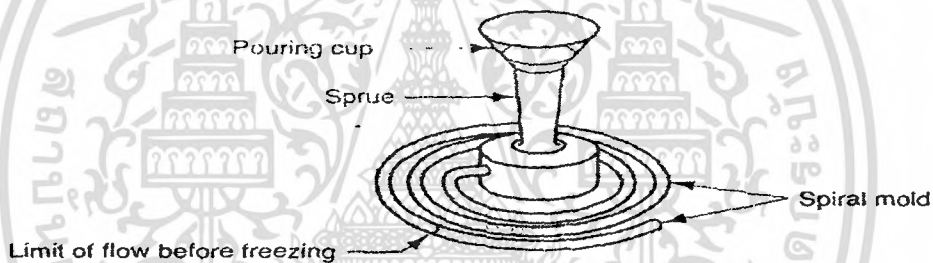
ความปั่นป่วนของโลหะเหลว คือ การไหลไม่เป็นระเบียบของโลหะเหลว การไหลแบบนี้จะเร่งให้เกิดออกไซด์ของโลหะขึ้น ซึ่งเมื่อชิ้นงานเกิดการแข็งตัวออกไซด์เหล่านี้จะฝังอยู่ในเนื้อโลหะทำให้คุณภาพของชิ้นงานลดลง นอกจากนี้ความปั่นป่วนของโลหะเหลวยังเร่งให้เกิดการสึกกร่อนของแม่แบบ (Mold erosion) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ผิวหน้าของแม่แบบเกิดการสึกกร่อนเนื่องจากการไหลของโลหะเหลว ที่อุณหภูมิสูงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นได้เร็วและความหนาแน่นของโลหะที่มีค่าสูงจะทำให้เกิดการสึกกร่อนขึ้น และการสึกกร่อนจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นถ้าโลหะเหลวเกิดการไหลแบบปั่นป่วน การสึกกร่อนจะทำความเสียหายให้กับการหล่อก่อนที่ชิ้นงานจะขึ้นในช่องว่างภายในแม่แบบ (Mold cavity) เนื่องจากจะทำให้รูปร่างของชิ้นงานผิดเพี้ยนไปจากเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลักษณะการไหล (Flow characteristics) ของของไหล เช่น โลหะเหลวจะสามารถแบ่งได้ 3 ช่วง ด้วยกันคือ
- 1 การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) เป็นการไหลที่ต้องการให้เกิดขึ้นขณะที่หน้าโลหะเหลวลงในแม่แบบ เนื่องจากการไหลที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ
  - 2 การไหลในช่วงเปลี่ยนแปลง (Transition flow) เป็นการไหลที่อนุภาคของของไหลเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน
  - 3 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence flow) เป็นการไหลที่มีความไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลของของไหลสูง และเป็นการไหลที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในการหล่อคังเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น

## 2.9 ความสามารถในการไหล

ในที่นี้หมายถึงความสามารถของโลหะเหลวในการไหลเข้าไปในช่องว่างภายในแม่แบบก่อนที่จะเกิดการแข็งความสามารถในการไหลเป็นคุณสมบัติตรงข้ามกับความหนืด ถ้าของไหลชนิดใดมีความหนืดมากก็จะมีความสามารถในการไหลต่ำ การทดสอบความสามารถในการไหลของเหลวในรูปที่ 2.9 ถ้าโลหะเหลวชนิดใดไหลไปได้ระยะทางที่ไกลกว่าก่อนที่จะเกิดการแข็งตัวแสดงว่าโลหะชนิดนั้นมีความสามารถในการไหลดีกว่าและปัจจัยต่างๆที่กำหนดความสามารถในการไหลของโลหะเหลวได้แก่



รูปที่ 2.9 การทดสอบความสามารถของการไหล

- 1 คุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนืด ถ้าความหนืดเพิ่มขึ้นความสามารถในการไหลก็จะลดลง ความตึงผิวก็มีอิทธิพลต่อความสามารถของการไหลของโลหะเหลวเช่นกัน เมื่อความตึงผิวของโลหะเหลวเพิ่มขึ้นความสามารถในการไหลก็จะลดลง สิ่งเจือปน (Inclusions) ที่ผสมอยู่ในโลหะเหลวก็ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการไหล ถ้าโลหะเหลวมีสิ่งเจือปนผสมอยู่มากความสามารถในการไหลก็จะลดลง ความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลว ก็มีผลต่อความสามารถในการไหล เนื่องจากเป็นปริมาณความร้อนที่โลหะเหลวจะต้องสูญเสียออกไปเพื่อกลายเป็นของแข็ง ดังนั้นถ้าความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวมีมากก็ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล นอกจากนี้ลักษณะแข็งตัวของโลหะชนิดนั้นก็ยังมีอิทธิพลต่อความสามารถในการไหล โลหะชนิดนั้นเกิดการแข็งตัวที่อุณหภูมิค่าใดค่าหนึ่งเพียงค่าเดียวหรือมีช่วงแข็งตัวความสามารถของการไหลเป็นช่วงสั้นๆก็มีความสามารถในการไหลสูง ส่วนโลหะผสมที่มีช่วงของการแข็งตัวกว้างจะมีความสามารถในการไหลต่ำเนื่องจากโลหะที่เกิดการแข็งตัวก่อนจะขัดขวางการไหลของโลหะเหลว

- 2 ปัจจัยในการหล่อ เช่น ลักษณะของแม่แบบ ถ้าแม่แบบที่ซับซ้อนมากจะทำให้ความสามารถของการไหลของโลหะเหลวลดลง นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ทำแม่แบบและคุณภาพผิวก็มีอิทธิพลต่อความสามารถของการไหลของโลหะเหลวเช่นกัน ถ้าวัสดุที่ใช้ทำแม่แบบนำความร้อนได้ดีโลหะเหลวจะสูญเสียความร้อนออกไปมาก ทำให้ความสามารถของการไหลลดลง และหากผิวภายในของแม่แบบมีความหยาบสูงก็จะทำให้ความสามารถของการไหลของน้ำโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงเช่นกัน อุณหภูมิของโลหะเหลวเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของการไหล ถ้าโลหะถูกหลอมจนมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวมากขึ้นเท่าใดความสามารถของการไหลก็จะสูงมากขึ้นเท่านั้น แต่จะต้องไม่ลืมว่าถ้าอุณหภูมิของโลหะเหลวสูงเกินไปจะทำให้เกิดความเสียหายต่อแม่แบบและชิ้นงานได้ เช่น โลหะที่มีความสามารถในการไหลสูงเกินไปจะแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างแบบได้ ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีส่วนเกินเกิดขึ้น อัตราการเทมีผลต่อความสามารถของการไหล ถ้าอัตราการเทต่ำจะมีการสูญเสียความร้อนออกจากโลหะเหลวเป็นปริมาณมากก่อนที่การเทจะสิ้นสุดดังนั้นถ้าอัตราการเทต่ำจะทำให้ความสามารถของการไหลโดยรวมต่ำเช่นกัน นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการหล่อก็มีผลต่อความสามารถของการไหล ถ้ามีการสูญเสียความร้อนออกจากระบบมากความสามารถของการไหลของโลหะเหลว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินงานทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่นำมาใช้และขั้นตอนการทดลอง ตอนแรกนี้ในส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้แยกตามการนำมาใช้งานดังต่อไปนี้

##### เครื่องผสมทราย

ใช้ในการผสมทรายโดยใช้ตะแกรงร่อนทรายลงในเครื่องผสมทรายเพื่อให้ได้ทรายที่มีเนื้อละเอียดเหมาะสมที่จะใช้งาน เติมน้ำ (bentonite) เด็กซ์ตริน (dextrin) และน้ำ เป็นตัวประสานให้ทรายจับตัวกันได้ดี เพื่อที่จะนำทรายที่ได้ไปทำแบบหล่อทราย เครื่องผสมทรายมีลักษณะดังที่เห็นในรูปที่ 3.1 มีช่องใส่ทรายและมีแกนหมุนตรงกลางเพื่อใช้ในการผสมทรายให้เข้ากัน



รูปที่ 3.1 เครื่องผสมทราย

##### ชุดทำแบบหล่อทราย

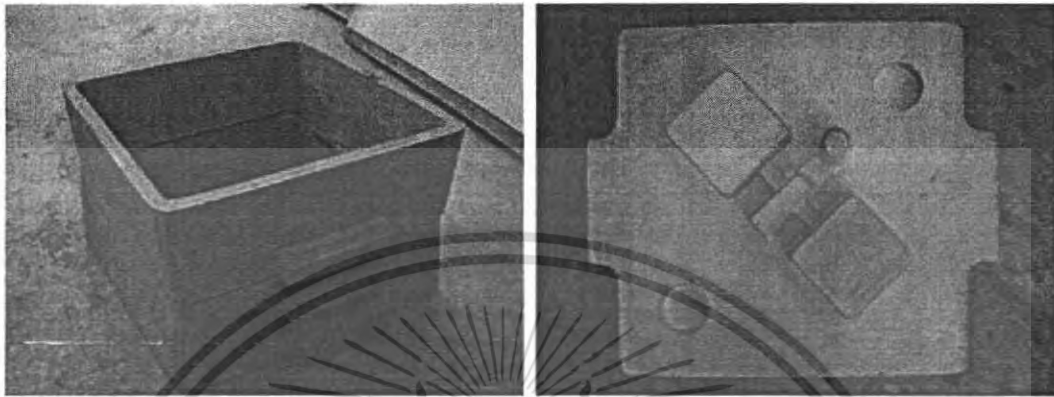
มีทั้งหมด 2 อุปกรณ์คือ หีบหล่อและกระสวน แต่ละอุปกรณ์มีลักษณะการใช้งานดังต่อไปนี้

หีบหล่อเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างแบบหล่อทราย ซึ่งแบบหล่อชิ้นงานจะอยู่ในหีบหล่อหีบ ในการทดลองนี้จะใช้หีบหล่อในกาทำแบบหล่อ 1 แบบทั้งหมด 2 หีบหล่อ ได้แก่ หีบหล่อบน และ หีบหล่ำล่าง ซึ่งทั้งสองแบบมีลักษณะเดียวกัน ด้านข้างของหีบหล่อจะมีลักษณะลาดเอียงลงมา มีรูปร่างใกล้เคียงสี่เหลี่ยมคางหมู ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

กระสวนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำแบบหล่อทราย เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวกำหนดลักษณะรูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่จะทำการหล่อออกมา โดยในการทดลองนี้เราใช้กระสวนที่ให้ชิ้นงานออกมาเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 3.2



(a)

(b)

รูปที่ 3.2 ชุดทำแบบหล่อทราย (a) หีบหล่อ (b) กระสวน

อุปกรณ์เสริมในการทำแบบหล่อทราย

เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการตกแต่งทรายในหีบหล่อให้มีลักษณะตามต้องการ ใช้เหล็กยึดทรายในหีบหล่อให้แน่น และใช้ท่อพีวีซีกับช้อนในการทำรูและรูเดิน พร้อมทั้งให้มีลักษณะตามต้องการ



(a)

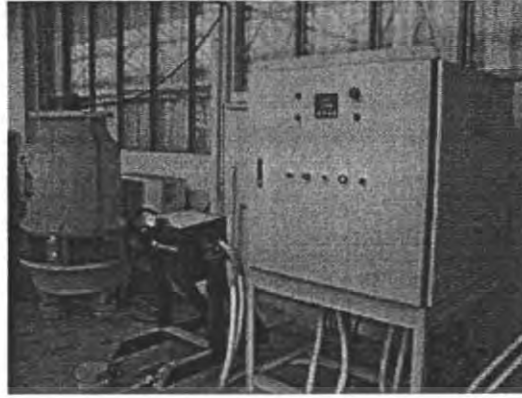
(b)

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์เสริมในการทำแบบหล่อทราย (a) เหล็กกระทุ้งทราย (b) ช้อนและท่อพีวีซี

เตาหลอมโลหะและชุดควบคุม

ใช้ในการหลอมอลูมิเนียม เพื่อนำน้ำโลหะอลูมิเนียมที่ได้มาเทลงในแบบหล่อ โดยในเตาหลอมโลหะนั้น ประกอบไปด้วย เบ้าหลอม เครื่องหล่อเย็น และเครื่องควบคุมการทำงานของเตาหลอม ดังแสดงในรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เตาหลอมโลหะและชุดควบคุม

### ชุดเก็บอุณหภูมิ

ชุดเก็บอุณหภูมิประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลและเครื่องเก็บข้อมูล (data logger) แสดงดังรูปที่ 3.5 (a) และ (b) ใช้ในการวัดอุณหภูมิน้ำโลหะอุณหภูมิในเตาหลอมโลหะ ปลายด้านหนึ่งของเทอร์โมคัปเปิลต่อกับเครื่องเก็บข้อมูลและปลายอีกด้านหนึ่งจุ่มปลายลงในน้ำโลหะ ผลอุณหภูมิแสดงบนหน้าจอเครื่องเก็บข้อมูล (data logger)



(a)

(b)

รูปที่ 3.5 ชุดเก็บอุณหภูมิ (a) เทอร์โมคัปเปิล (b) เครื่องเก็บข้อมูล

### เครื่องขัดผิวหน้าแบบละเอียด

ใช้ในการขัดผิวชิ้นงานทดสอบให้เรียบเพื่อที่จะนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยในตัวเครื่องจะมีจานขัด 2 จาน จานข้างหนึ่งใช้ขัดด้วยกระดาษทรายและอีกข้างใช้ขัดด้วยผงขัดอลูมินา ใช้อัตราเร็วในการขัดที่ 300 รอบ/นาที



รูปที่ 3.6 เครื่องชัดผิวหน้าแบบละเอียด

### กล้องจุลทรรศน์และคอมพิวเตอร์

กล้องจุลทรรศน์ใช้ในการถ่ายภาพรูพรุนจากชิ้นงานทดสอบ โดยกล้องต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม  
อิมเมจ โปร (Image Pro) ที่ใช้ในการวัดขนาดรูพรุน



3.7 กล้องจุลทรรศน์และคอมพิวเตอร์

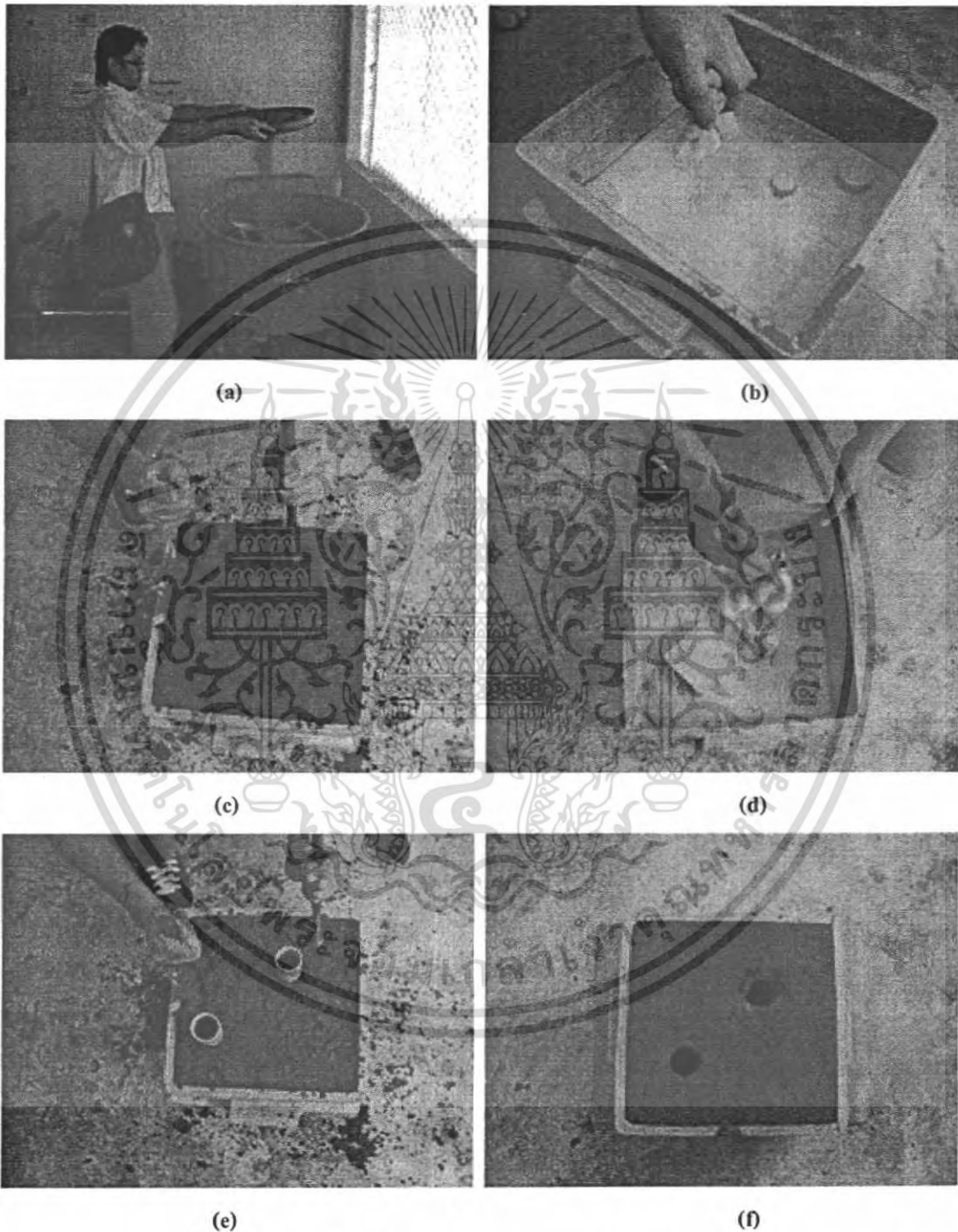
### 3.2 วิธีการทดลอง

#### การทำแบบหล่อทราย

เตรียมทราย โดยนำทรายที่ต้องการไปตากแดดจนแห้งโดยเตรียมทรายให้สามารถทำได้ทั้งหมด 4 แบบ เพื่อควบคุมความชื้นให้เท่ากัน หลังจากนั้นทำการผสมทรายที่เตรียมไว้กับ เบนโทไนต์ เด็กซ์ตริน และน้ำ ด้วยเครื่องผสมทราย เบนโทไนต์และน้ำจะเป็นตัวประสานทำให้ทรายจับตัวกัน รอให้ทรายจับตัวกันได้ดี หลังจากทรายจับตัวกันได้ดีแล้วนำทรายมาทำแบบหล่อทราย นำกระสวนวางลงบนหีบหล่อโดยวางด้านที่เป็นรูปทรงชิ้นงานลงด้านล่าง ให้อีกด้านหันขึ้นมาด้านบน วางหีบหล่ออีกอันบนกระสวน โรยแป้งให้ทั่วกระสวนก่อนจึงอัดทรายลงไปให้แน่นและเต็มหีบหล่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านบน จากนั้นพลิกหีบหล่อบนคว่ำลงบนไม้กระดาน โดยให้กระสวนด้านที่เป็นรูปทรงชิ้นงานและหีบหล่อด้านล่าง กลับขึ้นมาอยู่ด้านบน ทำการโรยแป้งให้ทั่วกระสวน วางท่อพีวีซีที่ใช้ทำเทและรูสันลงตามตำแหน่ง อัดทรายลงไปให้ แน่น และเติมหีบหล่อด้านบน จากนั้นยกหีบหล่อด้านบน และค่อยๆ ถอดกระสวนออก วางหีบหล่อบนลงบนหีบหล่อ

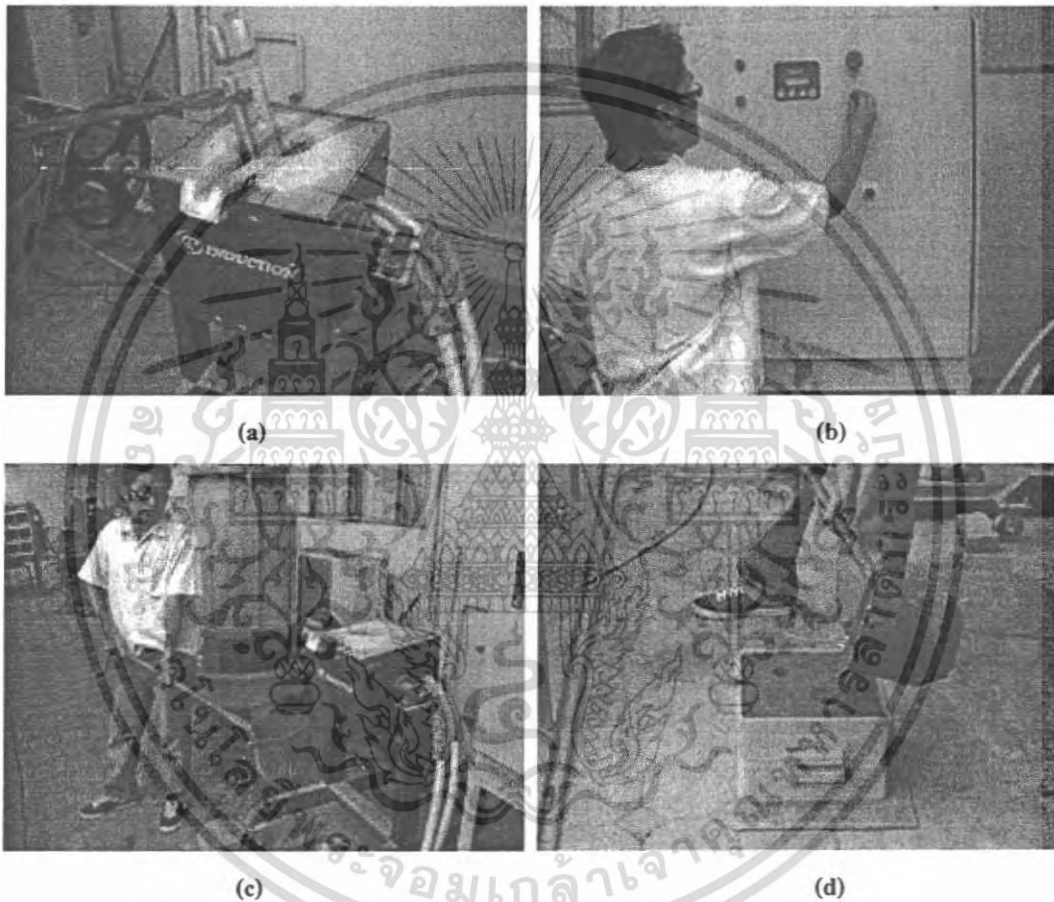


รูปที่ 3.8 ขั้นตอนในการทำแบบหล่อทราย

ล่างให้ตรงตามตำแหน่ง จะได้แบบหล่อทรายสำหรับการหล่อลูมิเนียม 1 แบบ ลำดับขั้นตอนการทำแบบหล่อที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นแสดงดังรูปที่ 3.8 และทำเช่นนี้อีกเพื่อให้ได้แบบหล่อ 4 แบบ

### หลอมอลูมิเนียมและเทน้ำโลหะ

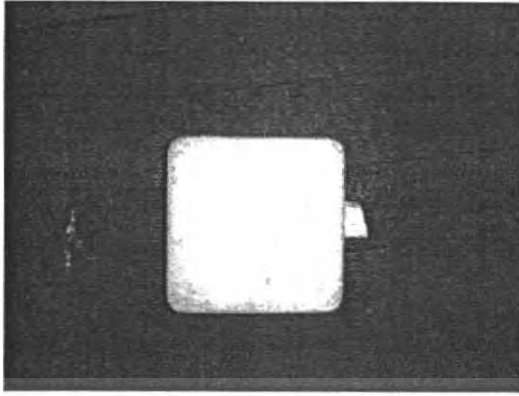
นำอลูมิเนียมที่ต้องการจะหลอมมาทำความสะอาดแล้วนำไปหลอมในเตาหลอมโลหะ โดยในตอนแรกปรับค่ากำลังไฟฟ้า ของเตาหลอมโลหะไว้ที่ 5 กิโลวัตต์ เมื่อโลหะหลอมละลายแล้วปรับค่ากำลังไฟฟ้าลดลงมาจนได้ช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ ใช้เทอโมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิและปรับค่ากำลังไฟฟ้าของเตาหลอมโลหะในการควบคุมอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมคงที่ จากนั้นทำการเทน้ำโลหะลงบนแบบหล่อทำการทดลองแบบเดิม แต่เปลี่ยนอุณหภูมิโดยการ โดยการปรับค่ากำลังไฟฟ้าของเตาหลอมโลหะ จากนั้นรอนชิ้นงานแข็งตัวและเย็นตัว



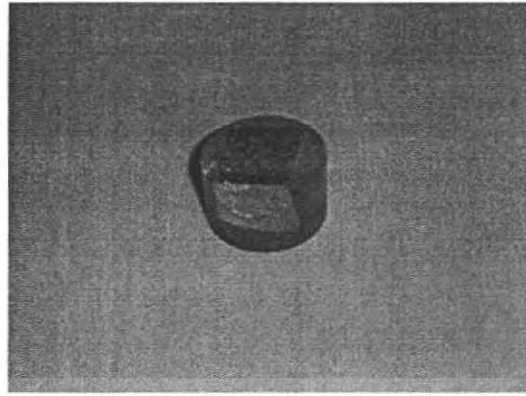
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนในการหลอมอลูมิเนียมและการเทน้ำโลหะ

### เตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์รูปพรุน

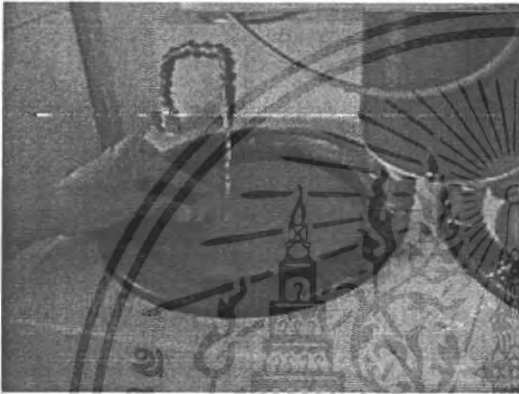
นำชิ้นงานหล่อ (รูปที่ 3.10 (a)) ไปผ่าและตัดแบ่งด้วยเลื่อยมือเพื่อเป็นชิ้นงานทดสอบให้ได้ขนาดประมาณ  $1.5 \times 2.0 \times 1.5$  ซม. โดยเลือกตรงตำแหน่งของชิ้นงานทดสอบที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานหล่อ หลังจากนั้นไปหล่อด้วยเรซิน เมื่อได้ชิ้นงานที่หล่อด้วยเรซิน (รูปที่ 3.10 (b)) แล้วนำไปขัดกับกระดาษทรายเบอร์ 800 1000 และ ผงขัดอลูมินา (รูปที่ 3.10 (c) และ (d)) เครื่องขัดผิวหน้าแบบละเอียด โดยใช้อัตราเร็วของเครื่องขัด 300 รอบ/นาที จนผิวชิ้นงานเรียบ



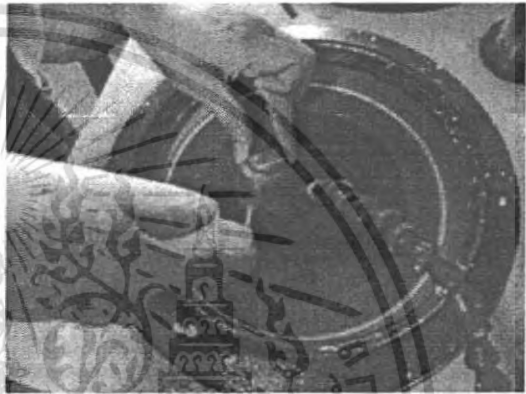
(a)



(b)



(c)



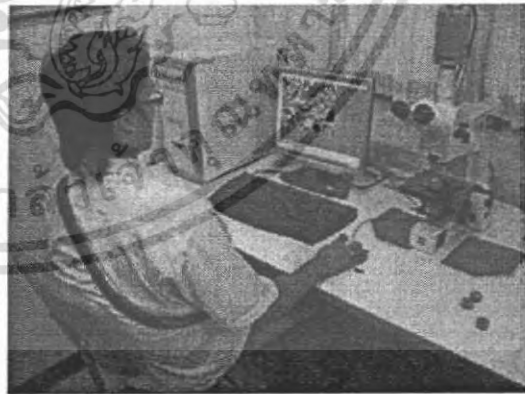
(d)

รูปที่ 3.10 ขั้นตอนเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์รูปพรุน

นำชิ้นงานทดสอบไปวิเคราะห์รูปพรุน



(a)



(b)

รูปที่ 3.11 นำชิ้นงานทดสอบไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์และวิเคราะห์รูปพรุน

นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้านี้นำไปส่องกล้องจุลทรรศน์โดยใช้โปรแกรมอิมเมจโปร ในการถ่ายภาพ โดยถ่ายภาพตัวอย่างทั้งหมด 25 ภาพของแต่ละอุณหภูมิทั้ง 4 อุณหภูมิ (713 730 745 และ 772 องศาเซลเซียส) และเก็บข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับรูปพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน นำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

หลังจากที่ถ่ายภาพและวัดขนาดรูปทรงซึ่งจะได้ออกมาเป็นพื้นที่ของรูปทรงแต่ละรูป จากนั้นนำข้อมูลพื้นที่ที่ได้มาจากการวัดมาคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของรูปทรง ความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูปทรง และเปอร์เซ็นต์รูปทรง โดยพื้นที่เพื่อนำไปวิเคราะห์เป็นผลการทดลองโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$D_{eqv} = 2\sqrt{A_p/\pi} \quad (3.1)$$

$$\rho_p = N_p/A_t \quad (3.2)$$

$$\%P = \left(\frac{A_{pc}}{A_t}\right) \times 100 \quad (3.3)$$

$D_{eqv}$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (ไมโครเมตร)

$A_p$  = พื้นที่ของรูปทรง (ตารางไมโครเมตร)

$\rho_p$  = ความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูปทรง (รูป/มม.<sup>2</sup>)

$N_p$  = จำนวนรูปทรง (รูป)

$A_t$  = พื้นที่ทั้งหมด (มม.<sup>2</sup>)

$\%P$  = เปอร์เซนต์รูปทรง โดยพื้นที่

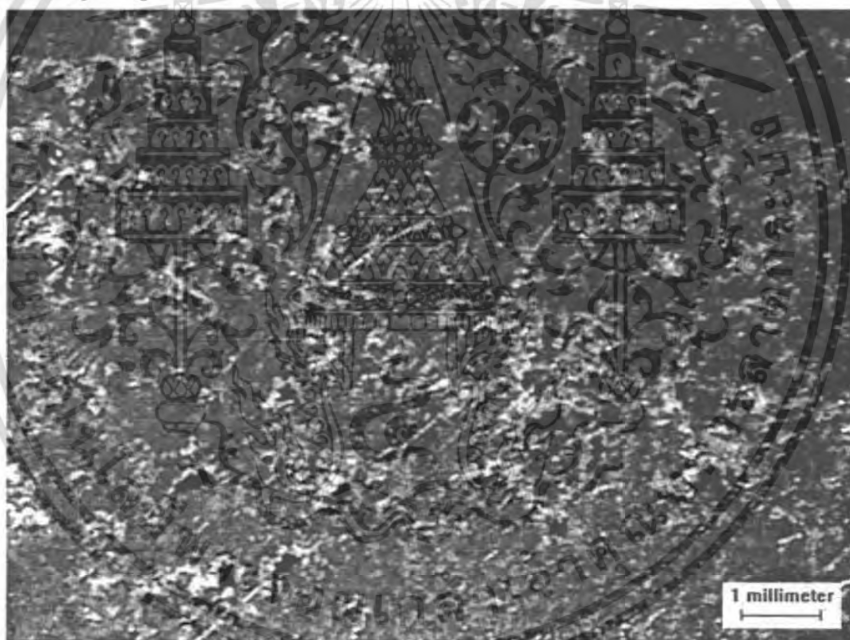
$A_{pc}$  = พื้นที่รูปทรงทั้งหมด (มม.<sup>2</sup>)

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

หลังจากที่ได้นำชิ้นงานทดสอบของทั้ง 4 อุณหภูมิเตไปส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อถ่ายภาพทั้งหมดชิ้นงานละ 25 ภาพ และนำมาวัดขนาดพื้นที่ของรูพรุน จากนั้นนำไปคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า เปรอร์เซ็นต์รูพรุนโดยพื้นที่ และความหนาแน่นของรูพรุนต่อพื้นที่ นำผลมาวิเคราะห์หาแนวโน้มว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลอย่างไร ต่อความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูพรุน ขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุด และเปอร์เซ็นต์รูพรุนโดยพื้นที่ ในส่วนแรกนี้จะแสดงผล การทดลองของชิ้นงานดังนี้

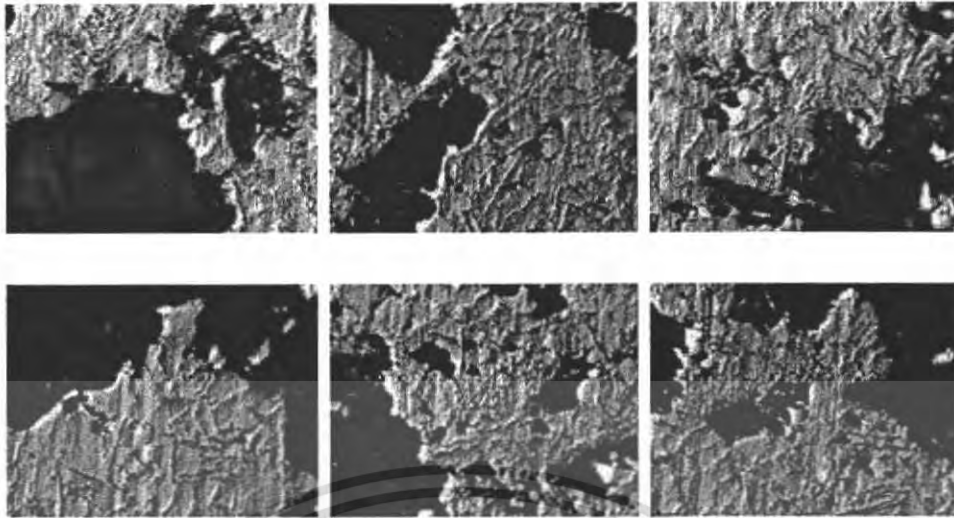
#### 4.1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 713 องศาเซลเซียส



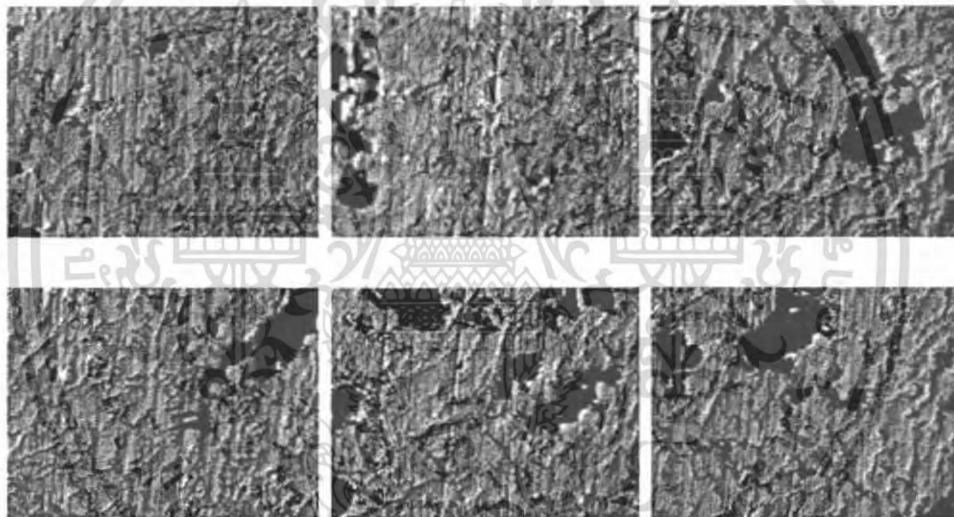
รูปที่ 4.1 รูพรุนที่เกิดในชิ้นงาน T713 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน T713 (ชิ้นงาน T713 หมายถึง ชิ้นงานที่ได้จากการ หล่อโดยมีอุณหภูมิ 713 องศาเซลเซียส) รูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นส่วนใหญ่จะมีขนาดใหญ่ และสามารถเห็นความแตกต่าง ได้อย่างชัดเจนระหว่างรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน T713 นั้น มีลักษณะที่ไม่ แน่นอนและมีรูปร่างซับซ้อน และสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งความซับซ้อนของรูพรุนเหล่านี้จะมีผลต่อการวัด โดยอาจทำให้เกิดการผิดพลาด รูพรุนที่มีขนาดใหญ่อาจถูกตัดแบ่งเป็นรูเล็กๆ หลากๆ ทำให้จำนวนรูพรุนที่วัดได้มีค่า มากกว่าที่เป็นจริงและขนาดพื้นที่ของรูพรุนนั้นมีค่าน้อยกว่าที่เป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 รูปถ่ายรูพรุนที่มีขนาดใหญ่จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T713



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างรูพรุนที่มีขนาดเล็กจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T713

จากรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 เป็นตัวอย่างรูปถ่ายรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็กของชิ้นงาน T713 ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างของขนาดรูพรุนระหว่างรูขนาดเล็กและรูขนาดใหญ่ สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีขนาดที่ต่างกันมากหลายเท่าตัว รูพรุนขนาดใหญ่จะมีลักษณะที่ไม่แน่นอนและมีรูปร่างที่ซับซ้อนมากกว่ารูพรุนขนาดเล็ก

จากรูปเป็นตัวอย่างรูพรุนใช้วิธีถ่ายภาพที่ตัดขวางภาพนั้นมีข้อดีตรงที่มีความแม่นยำในการวัดพื้นที่รูพรุนทั้งหมดในชิ้นงาน เนื่องจากการวัดที่ละรูปไปเรื่อยๆ นั้น รูปแต่ละรูปจะสังเกตเห็นที่รูพรุนแต่ละรูได้ง่าย ทำให้เกิดความแม่นยำในการวัด เพราะถ้านำรูปถ่ายทั้ง 25 ภาพมารวมกันจะได้ภาพที่ใหญ่ขึ้นมากทำให้ต้องย่อขนาดภาพลงมา ซึ่งจะทำให้ยากต่อการสังเกตรูพรุน ซึ่งเป็นอุปสรรคในการวัดพื้นที่

แต่การใช้วิธีการถ่ายภาพแบบแยกถ่ายนี้ ก็มีข้อเสียตรงที่สามารถเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากว่ารูพรุนขนาดใหญ่ที่ครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 1 รูป ที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 5 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้การวัดขนาดรูพรุนเกิดความคลาดเคลื่อน รูพรุนขนาดใหญ่จะวัดขนาดได้ต่ำกว่าความเป็นจริง แต่ถ้านำพื้นที่แต่ละส่วนมาต่อกัน จะครอบคลุมรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่า เพราะจะทำให้รูพรุนขนาดใหญ่ไม่ถูกตัดแบ่งออกไป

เหตุผลที่เลือกใช้กำลังขยาย 5 เท่า เนื่องจากว่าเป็นกำลังขยายที่พอดีสำหรับส่องดูขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน สามารถสังเกตเห็นรูพรุนได้จึงทำให้ง่ายต่อการวัด แต่ถ้าเพิ่มกำลังขยายขึ้นอีก ก็จะมีผลทำให้ภาพรูพรุนและพื้นที่ของอลูมิเนียมที่แสดงผลออกมามีขนาดใหญ่ขึ้นมาก การวัดขนาดจะทำได้ยากขึ้น เนื่องจากว่ารูพรุนขนาดใหญ่จะครอบคลุมพื้นที่รูปถ่ายมากขึ้นไปอีก

การที่แสดงผลขนาดรูพรุนและความหนาแน่นนั้น เนื่องจากว่ารูพรุนมีผลต่อคุณสมบัติทางกล ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานหล่ออลูมิเนียมลดลง ความหนาแน่นต่อพื้นที่นั้นเป็นการแสดงค่าจำนวนรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ซึ่งจำนวนรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ก็มีผลทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานหล่ออลูมิเนียมลดลงเช่นกัน

เมื่อเราได้รูปถ่ายทั้งหมด 25 รูปแล้ว จากนั้นนำไปวัดพื้นที่ของรูพรุนทั้งหมด จากนั้นก็นำเอาข้อมูลเหล่านี้มาคำนวณหา เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของรูพรุน ความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูพรุน เปอร์เซ็นต์รูพรุนโดยพื้นที่ และค่าเฉลี่ยขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุด 10 รู เนื่องจากการใช้ค่าเฉลี่ย รูพรุนที่ใหญ่ที่สุด 10 รูแรกจะทำให้ได้ความถูกต้องและแม่นยำมากกว่าการดูเฉพาะรูพรุนที่ใหญ่ที่สุดเพียงรูพรุนเดียว ซึ่งจากที่กล่าวมาจะได้ผลการคำนวณดังต่อไปนี้

1. ค่าเฉลี่ยรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ที่สุด 10 รู = 485.0 ไมโครเมตร
2. ความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูพรุน = 9.7 รู/ม.<sup>2</sup>
3. เปอร์เซ็นต์รูพรุน โดยพื้นที่ = 25.8 เปอร์เซ็นต์

#### 4.2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส

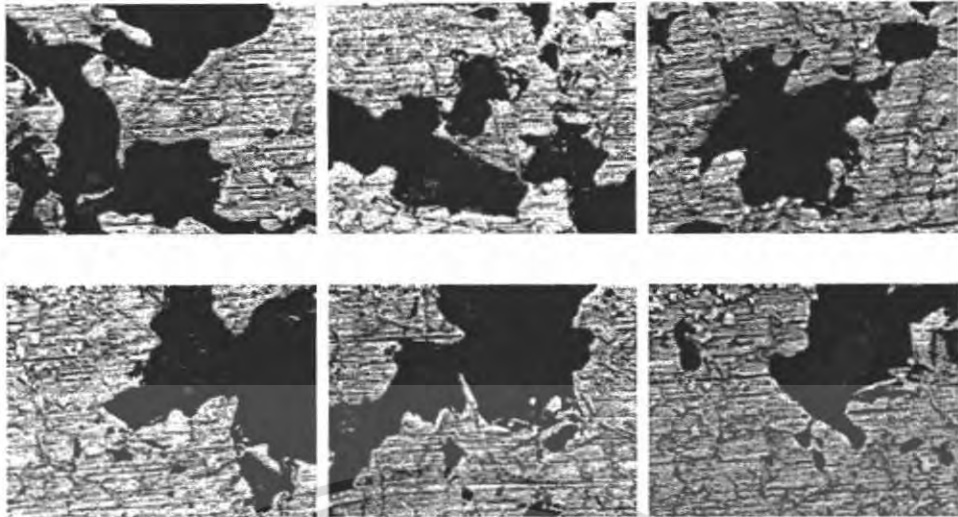


รูปที่ 4.4 รูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน T730 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ

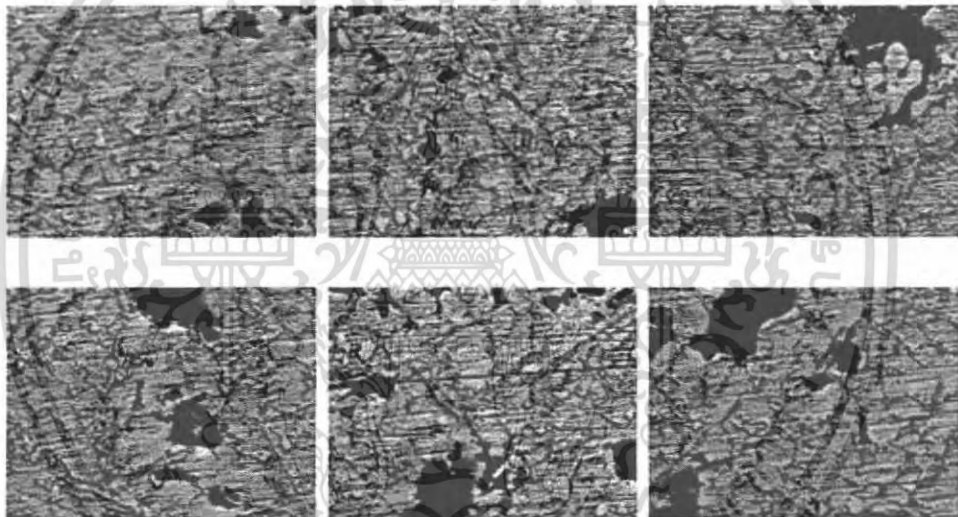
ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน T730 ยังคงมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนและซับซ้อน แต่ที่แตกต่างและเห็นได้

ชัดเจนก็คือขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างจะมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 รูปถ่ายรูพรุนที่มีขนาดใหญ่จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T730



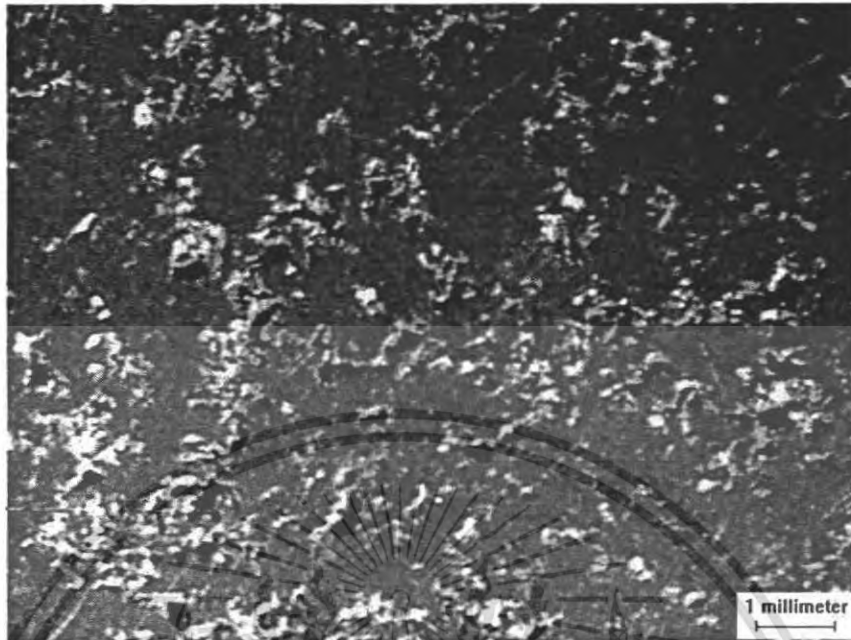
รูปที่ 4.6 รูปถ่ายรูพรุนที่มีขนาดเล็กจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T730

จากรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 เป็นตัวอย่างรูปถ่ายของชิ้นงาน T730 ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างของขนาดรูพรุนที่มีขนาดเล็กและขนาดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีขนาดที่แตกต่างกันพอสมควร ซึ่งลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นยังคงมีลักษณะที่ไม่แน่นอนและมีรูปร่างที่ซับซ้อน

ลักษณะของรูพรุนที่ได้จากการวิเคราะห์ของชิ้นงาน T730

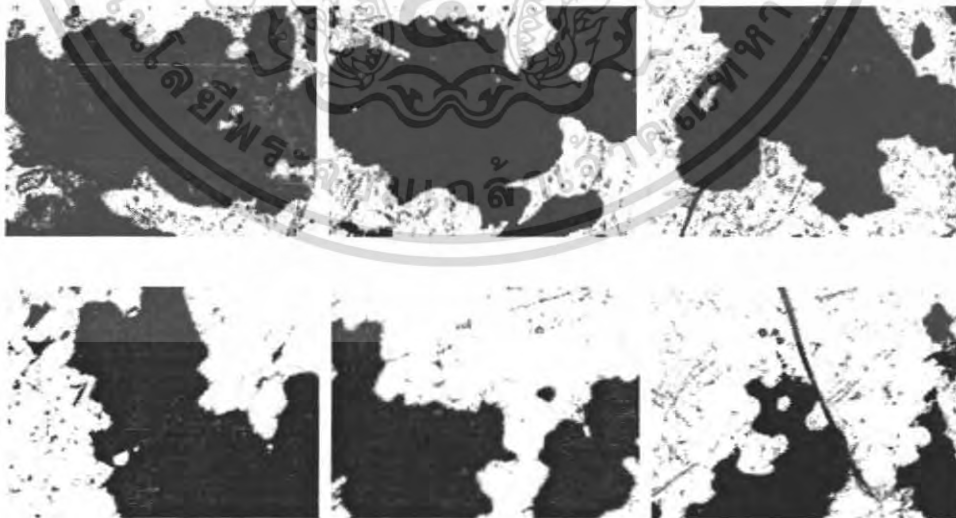
- |   |   |                  |
|---|---|------------------|
| 1. ค่าเฉลี่ยรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ที่สุด 10 รู | = | 437.6 ไมโครเมตร  |
| 2. ความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูพรุน           | = | 9.9 รู/ม.²       |
| 3. เปอร์เซ็นต์รูพรุน โดยพื้นที่             | = | 18.5 เปอร์เซ็นต์ |

### 4.3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 745 องศาเซลเซียส



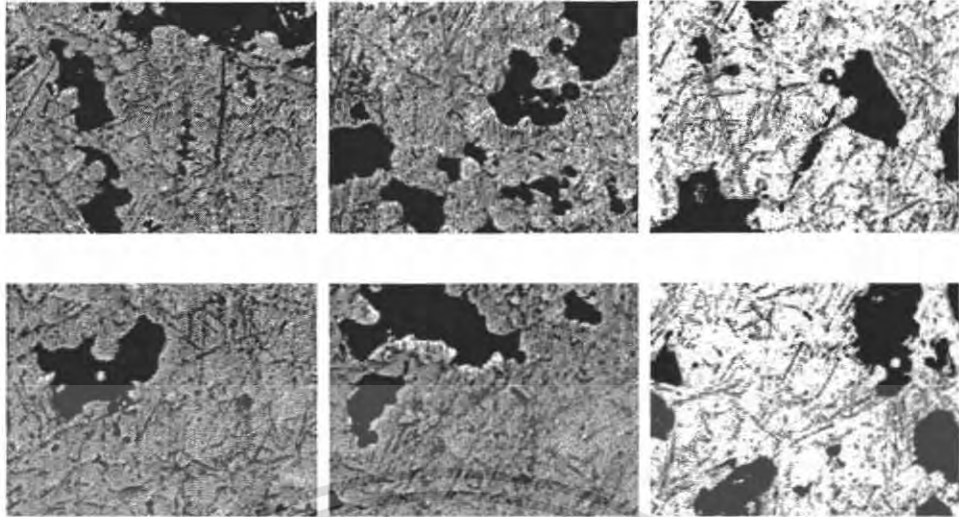
รูปที่ 4.7 รูพรุนที่เกิดในชิ้นงาน T745 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน T745 นั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงาน T713 ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นมีส่วนใหญ่มิขนาดใหญ่มาก และสามารถเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนระหว่างรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน T745 ยังคงเหมือนเดิมมีลักษณะที่ไม่แน่นอนและมีรูปร่างซับซ้อนสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.8 รูปถ่ายรูพรุนที่มีขนาดใหญ่จากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T745

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



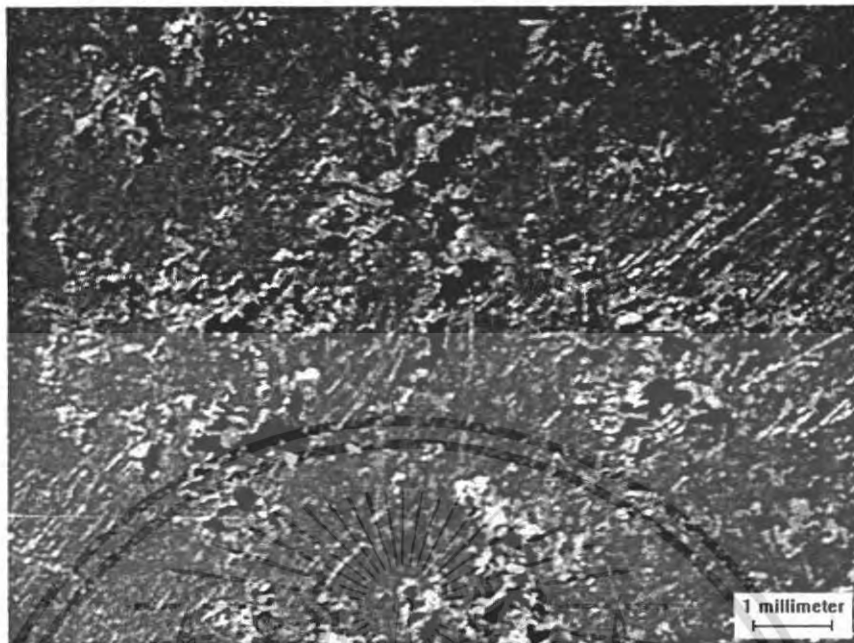
รูปที่ 4.9 รูปถ่ายรูพรุนที่มีขนาดเล็กจากห้องจุดทิ้งที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T745

จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ทำให้เห็นความแตกต่างของขนาดรูพรุนที่มีขนาดเล็กและขนาดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งสามารถเห็นได้ว่ามีขนาดไม่แตกต่างกันมากดังเช่นรูพรุนในชิ้นงาน T713 และ T730 อาจกล่าวได้ว่าส่วนมากรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน T745 นั้นค่อนข้างที่จะมีขนาดใหญ่ รูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นยังคงมีลักษณะที่ไม่แน่นอนและมีรูปร่างที่ซับซ้อนเหมือนกับที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำอื่นๆ

ลักษณะของรูพรุนที่ได้จากการวิเคราะห์ของชิ้นงาน T745

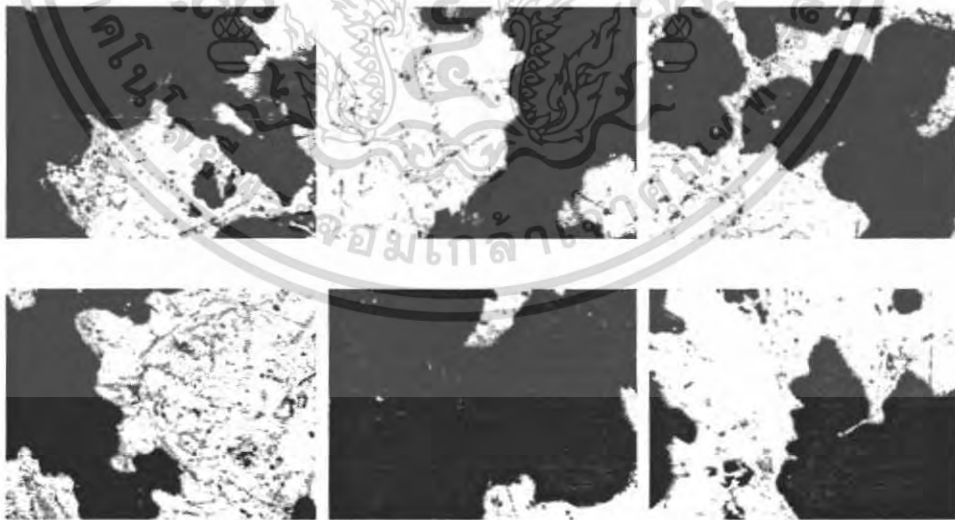
- |   |   |                         |
|---|---|-------------------------|
| 1. ค่าเฉลี่ยรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ที่สุด 10 รู | = | 507.4 ไมโครเมตร         |
| 2. ความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูพรุน           | = | 8.6 รู/มม. <sup>2</sup> |
| 3. เปอร์เซ็นต์รูพรุน โดยพื้นที่             | = | 27.7 เปอร์เซ็นต์        |

#### 4.4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ 772 องศาเซลเซียส

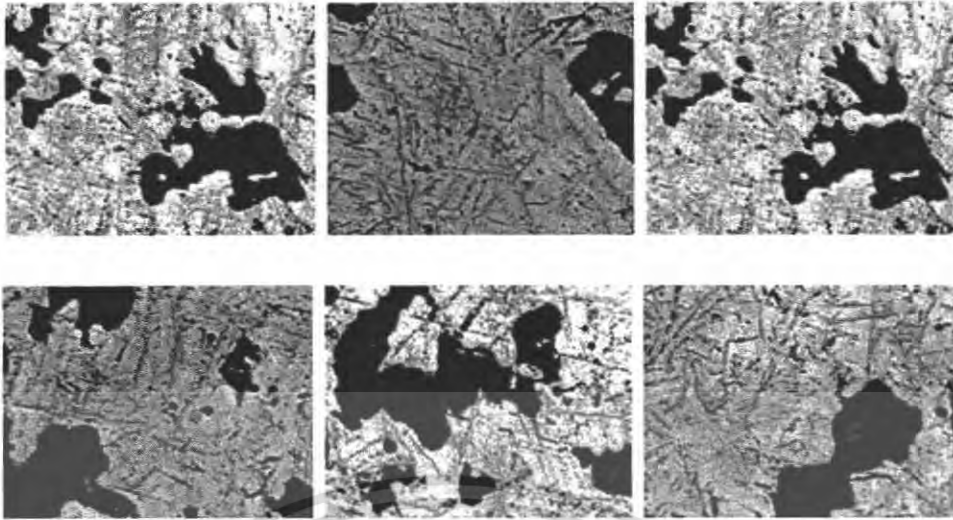


รูปที่ 4.10 รูพรุนที่เกิดในชิ้นงาน T772 ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ

จากรูปที่ 4.10 สามารถสังเกตว่าลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน T772 นั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับชิ้นงาน T745 ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นส่วนใหญ่จะมีขนาดใหญ่ และสามารถเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนระหว่างรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน T772 ยังคง มีลักษณะที่ไม่แน่นอนและมีรูปร่างซับซ้อน



รูปที่ 4.11 รูปถ่ายรูพรุนที่มีขนาดใหญ่จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T772



รูปที่ 4.12 รูปถ่ายรูพรุนที่มีขนาดเล็กจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5 เท่าของชิ้นงาน T772

จากรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 รูพรุนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน T772 มีลักษณะคล้ายคลึงกับรูพรุนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน T745 ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าส่วนมากรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน T772 ก่อนข้างที่จะมีขนาดใหญ่ และรูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นยังคงมีลักษณะที่ไม่แน่นอนและมีรูปร่างที่ซับซ้อนเหมือนรูพรุนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานอื่นๆ

ลักษณะของรูพรุนที่ได้จากการวิเคราะห์ของชิ้นงาน T772

- |   |   |                        |
|---|---|------------------------|
| 1. ค่าเฉลี่ยรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ที่สุด 10 รู | = | 543.1 ไมโครเมตร        |
| 2. ความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูพรุน           | = | 8.5 รู/ม. <sup>2</sup> |
| 3. เปอร์เซ็นต์รูพรุน โดยพื้นที่             | = | 29.2 เปอร์เซ็นต์       |

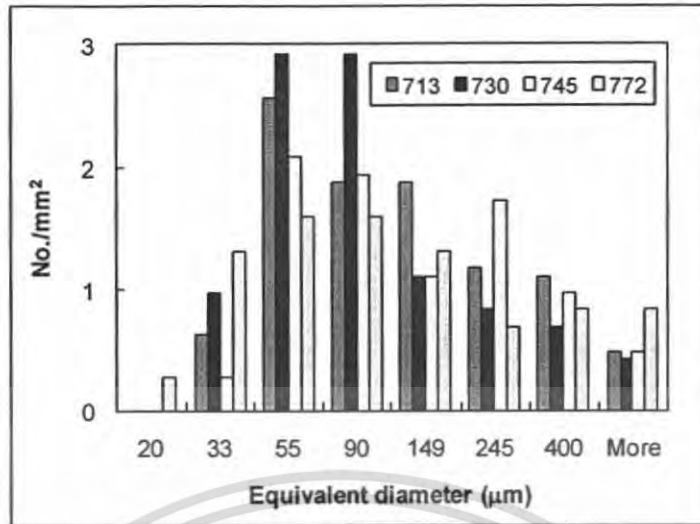
#### 4.5 ผลกระทบอุณหภูมิต่อรูพรุน

หลังจากที่ได้ผลการทดลองและผลการคำนวณของทั้ง 4 อุณหภูมิเทแล้ว จากนั้นนำข้อมูลเหล่านั้นมาเปรียบเทียบกัน โดยใช้กราฟและแผนภูมิต่างในการสังเกตลักษณะและแนวโน้มต่างๆ เพื่อที่จะนำแนวโน้มของข้อมูลที่ได้ไปทำการสรุปผลการทดลอง โดยแยกเป็นการเปรียบเทียบได้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

##### 4.5.1 การกระจายตัวของรูพรุน

รูปที่ 4.13 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนขนาดต่างๆต่อ 1 หน่วยพื้นที่ โดยที่แกน X จะแสดงขนาดของรูพรุนโดยวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า ขนาดต่างๆมีหน่วยเป็นไมโครเมตร และแกน Y จะแสดงความหนาแน่นของรูพรุนที่เกิดขึ้นในพื้นที่ชิ้นงาน 1 มม.<sup>2</sup> ซึ่งมีหน่วยเป็น จำนวนรู/ม.<sup>2</sup>

จากรูปนั้นจะเห็นได้ว่า ขนาดของรูพรุนที่อยู่ในช่วง 55 – 90 ไมโครเมตรมีการกระจายตัวมากที่สุดหรือมีจำนวนต่อพื้นที่มากที่สุด ในขณะที่รูพรุนขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตรมีจำนวนต่อพื้นที่น้อยที่สุด การกระจายตัวของรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่า 90 ไมโครเมตร จะมีแนวโน้มค่อยๆลดลงไปเรื่อยๆ และเมื่อสังเกตแนวโน้มของอุณหภูมิเททั้งหมดจะพบว่า มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันทั้ง 4 อุณหภูมิเท อาจกล่าวได้ว่าแนวโน้มของการกระจายตัวของรูพรุนไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท

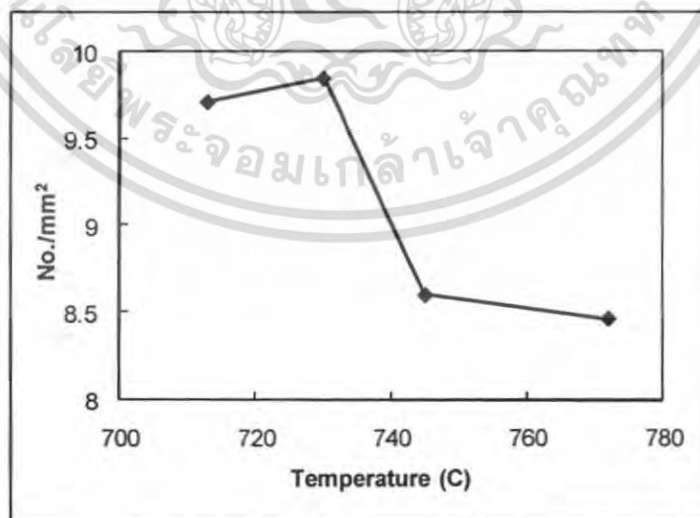


รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการกระจายตัวของรูพรุนที่อุณหภูมิต่างๆ

#### 4.5.2 ความหนาแน่นต่อพื้นที่รูพรุน

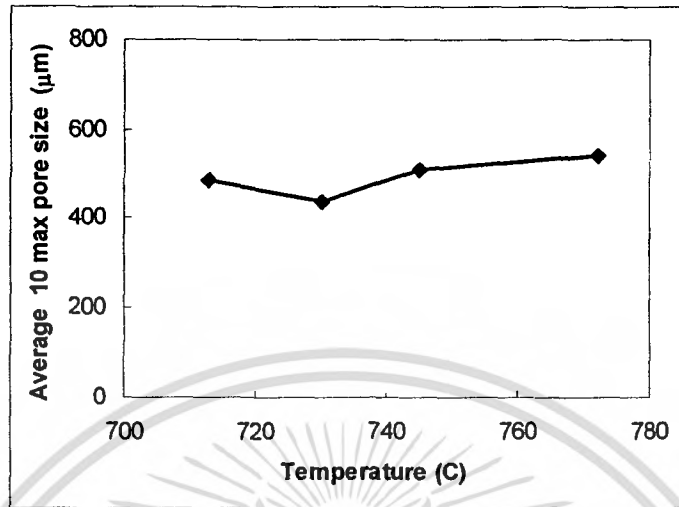
จากรูปที่ 4.14 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูพรุนที่อุณหภูมิต่างๆมีค่าใกล้เคียงกันมากแทบจะไม่ต่างกันเลย โดยสังเกตได้จากค่าในแกน Y ซึ่งมีค่าไม่ต่างกันมากอยู่ระหว่าง 8 – 10 รู/มม.<sup>2</sup> ซึ่งมีผลมาจากจำนวนรูพรุนที่วัดได้ของแต่ละอุณหภูมิเทานั้นมีใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่ส่งผลกับความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูพรุน

อย่างไรก็ตามจากการวัดขนาดของรูพรุนนั้นบางรูอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากว่าลักษณะของรูพรุนมีลักษณะที่ไม่แน่นอน และมีรูปร่างซับซ้อน อาจทำให้เกิดการผิดพลาดในวัด รูพรุนที่มีขนาดใหญ่อาจถูกตัดแบ่งเป็นรูเล็กๆ หลายรู ทำให้จำนวนรูพรุนที่วัดได้มีค่ามากกว่าที่เป็นจริง



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูพรุนที่อุณหภูมิต่างๆ

### 4.5.3 ขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุด



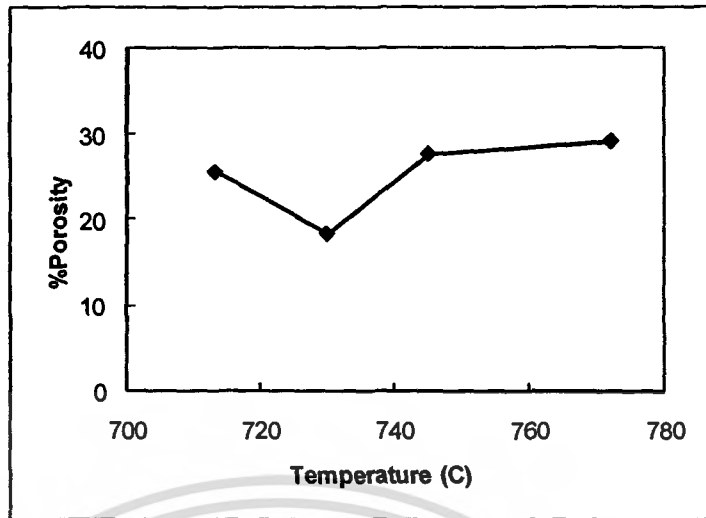
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุดที่อุณหภูมิต่างๆ

การเปรียบเทียบขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุด จะนำขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุด 10 รูแรกมาคำนวณค่าเฉลี่ย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้นของบทนี้ จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุด นั้นอยู่ในช่วง 440 - 540 ไมโครเมตรและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ จากที่กล่าวข้างต้นผลที่ได้จากการวัดขนาดรูพรุนขนาดใหญ่สนับสนุนกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ว่า แนวโน้มของขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุดจะเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิตามทฤษฎี ที่กล่าวไว้ว่าปริมาณไฮโดรเจนที่ละลายในน้ำโลหะอลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้นตามปริมาณไฮโดรเจนนั้น อย่างไรก็ตามจากทฤษฎีการเกิดรูพรุน โดยส่วนมากแล้วรูพรุนที่มีขนาดใหญ่เป็นผลมาจากการหดตัวของโลหะระหว่างการแข็งตัวร่วมกับไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในน้ำโลหะ ซึ่งไฮโดรเจนที่อยู่ในน้ำโลหะอาจจะส่งผลต่อการขยายใหญ่ขึ้นของรูพรุนขนาดใหญ่

ส่วนข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน T730 นั้น อาจเกิดขึ้นจากการวัดขนาดของรูพรุนบางรู โดยมีความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากว่าลักษณะของรูพรุนมีลักษณะที่ไม่แน่นอน อาจทำให้ตอนวัดเข้าใจผิดได้ว่าชิ้นส่วนของรูพรุนบางส่วนเป็นอีกรูพรุน

### 4.5.4 เปอร์เซนต์รูพรุน

เปอร์เซ็นต์ที่วัดได้เป็นเปอร์เซ็นต์โดยพื้นที่ คิดเทียบจากพื้นที่ของรูพรุนทั้งหมดต่อพื้นที่ทั้งหมดที่ทำกรวัด จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่า แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์รูพรุนนั้นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิ เหมือนกับผลเปรียบเทียบขนาดรูพรุน ซึ่งตรงกับทฤษฎีการเกิดรูพรุนที่เกิดจากปริมาณไฮโดรเจนที่ละลายในน้ำโลหะอลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้นตามปริมาณไฮโดรเจน สัดส่วนเปอร์เซ็นต์รูพรุนที่วัดได้มีผลมาจากรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งหากดูจากการกระจายตัวของรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ (มากกว่า 150 ไมโครเมตร) ในรูปที่ 4.13 แล้ว จำนวนรูพรุนต่อหน่วยพื้นที่ในชิ้นงานที่อุณหภูมิ 730 องศาเซลเซียส มีจำนวนต่ำที่สุด ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์รูพรุนที่วัดได้ ต่ำกว่าอุณหภูมิอื่น



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์รูพรุนโดยพื้นที่ที่อุณหภูมิต่างๆ



## บทที่ 5

### สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

หลังจากที่ได้ผลการทดลองและผลการคำนวณของทั้ง 4 อุณหภูมิและได้แนวโน้มของอุณหภูมิที่มีผลต่อการกระจายตัวของรูพรุน ความแน่นต่อพื้นที่รูพรุน และขนาดรูพรุน ซึ่งสามารถนำมาสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. อุณหภูมิที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อการกระจายตัวของรูพรุนขนาดต่างๆ
2. อุณหภูมิที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อความหนาแน่นต่อพื้นที่ของรูพรุน
3. ขนาดรูพรุนที่ใหญ่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิ
4. เปอร์เซ็นต์รูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิ

#### 5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการดำเนินงาน

1. การวัดขนาดของรูพรุนนั้นบางรูอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากว่าลักษณะของรูพรุนมีลักษณะที่ไม่แน่นอน และมีรูปร่างซับซ้อน อาจทำให้เกิดการผิดพลาดในวัด รูพรุนที่มีขนาดใหญ่อาจถูกตัดแบ่งเป็นรูเล็กๆ หลายๆ รู ทำให้จำนวนรูพรุนที่วัดได้มีค่ามากกว่าที่เป็นจริง อีกทั้งยังไม่ได้ทำการวัดรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำเช่นกัน
2. การควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะอลูมิเนียมทำได้ยาก เนื่องจากเตาหลอมที่ใช้เป็นแบบเปิด จึงมีการถ่ายเทอุณหภูมิเนื่องจากปัจจัยภายนอกเช่น ความชื้นในอากาศ อุณหภูมิภายนอกเตา ที่ไม่สามารถควบคุมได้ และการเทน้ำโลหะจากเบ้าหลอมนั้นต้องเทผ่านเบ้าเทก่อนถึงจะนำไปเทลงในแบบหล่อ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนทำให้อุณหภูมิเตาลดลงไป

#### 5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากปัญหาและอุปสรรคที่กล่าวไว้ข้างต้น คณะผู้ทำงานวิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ลดกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ลงเพื่อใช้สำหรับการวัดขนาดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ และเพิ่มกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์เพื่อใช้สำหรับการวัดขนาดรูพรุนที่มีขนาดเล็ก
2. นำเตาหลอมระบบสุญญากาศมาใช้ และทำการเทน้ำโลหะจากเบ้าหลอมลงในแบบหล่อ

## บรรณานุกรม

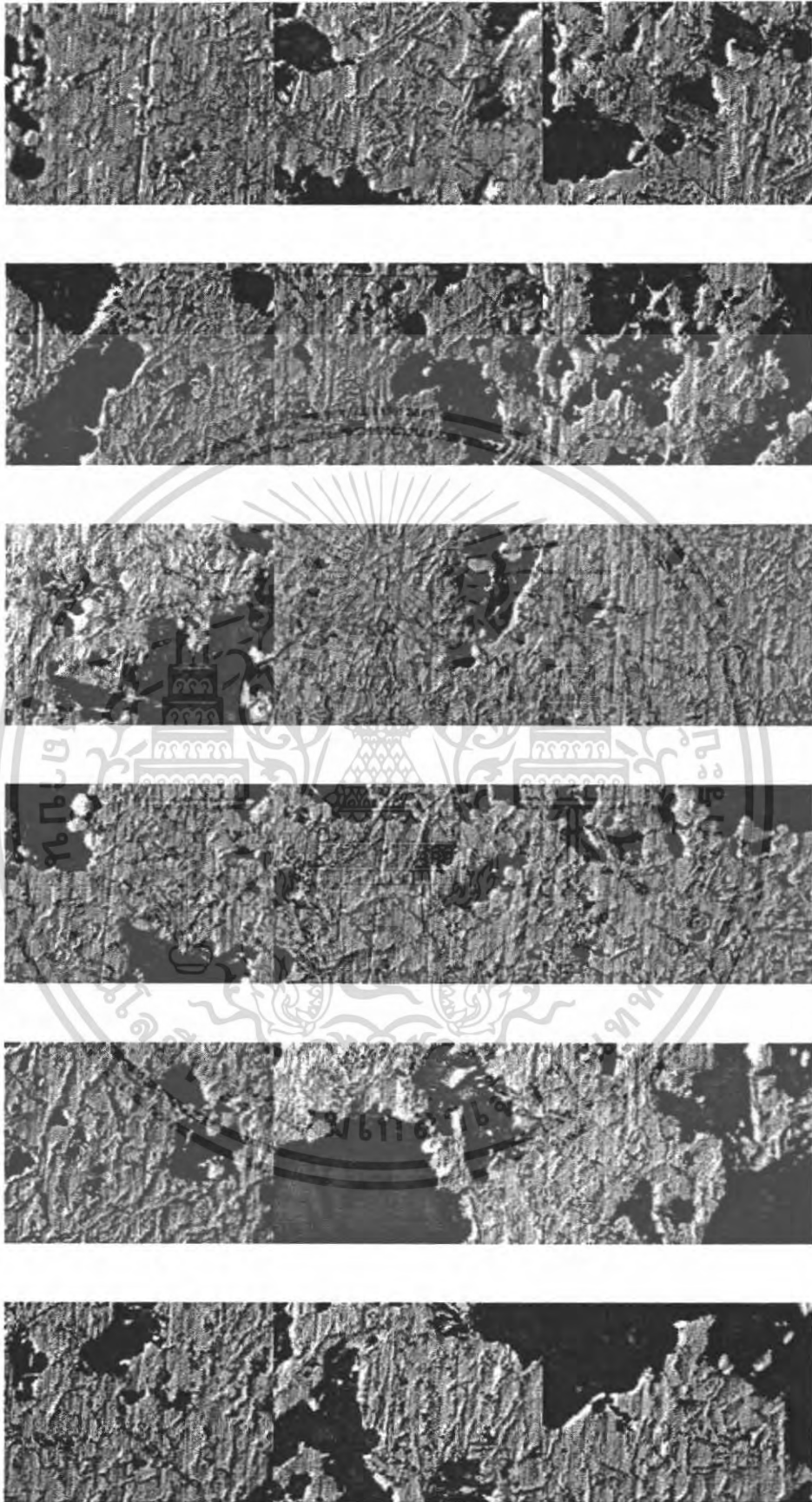
- 1 ผศ. สุธัชช ประเสริฐสกุล, เทคโนโลยีการหล่อโลหะ2, สำนักพิมพ์ ไซน์ แอนด์ เอนจิเนียริง, 2540
- 2 ผศ. ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ, เอกสารประกอบการเรียนกรรมวิธีการผลิต 1, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3 เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์, พื้นฐานงานหล่อโลหะ, สยามสปอร์ต ซินดิเคท จำกัด, 2538





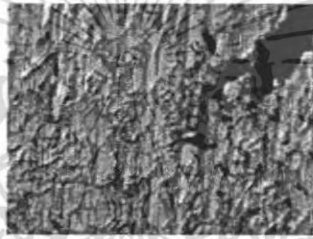
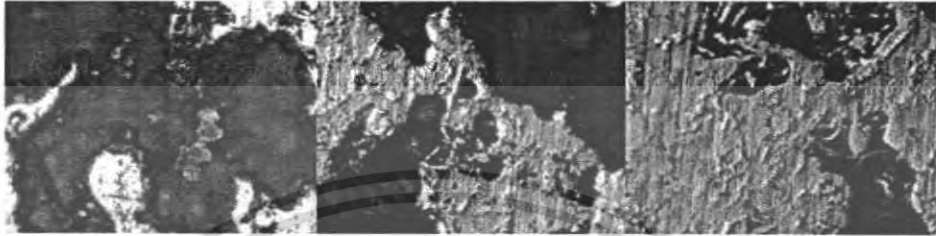
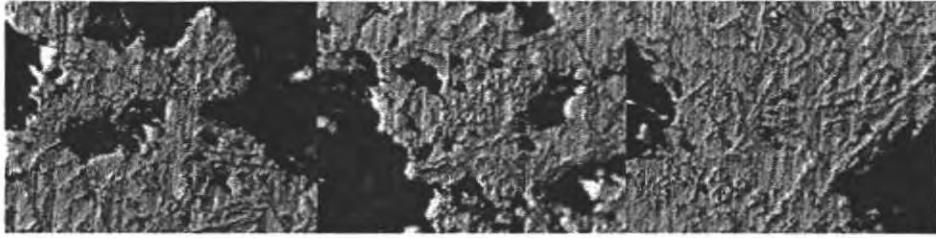
## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผก.1 ตัวอย่างรูปถ่ายรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผก.1 ตัวอย่างรูปถ่ายรูพรุน (ต่อ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.1 ผลการวัดพื้นที่รูพรุนและคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของชิ้นงาน T713

ลำดับที่	รูปถ่ายที่	$A_p (\mu\text{m})^2$	$D_{\text{eqv}} (\mu\text{m})$	ลำดับที่	รูปถ่ายที่	$A_p (\mu\text{m})^2$	$D_{\text{eqv}} (\mu\text{m})$
1	1	8821.54	105.98	31	4	3135.67	63.19
2	1	6430.85	90.49	32	4	833.18	32.57
3	1	7386.00	96.97	33	5	6980.67	94.28
4	1	1060.24	36.74	34	5	2373.80	54.98
5	1	947.65	34.74	35	5	992.68	35.55
6	1	915.74	34.15	36	5	2882.34	60.58
7	1	619.25	28.08	37	5	1529.37	44.13
8	1	668.04	29.16	38	5	7618.69	98.49
9	1	654.91	28.88	39	5	11337.96	120.15
10	2	29232.50	192.92	40	5	21493.71	165.43
11	2	3130.04	63.13	41	5	71681.37	302.11
12	2	765.62	31.22	42	6	112343.80	378.21
13	2	34680.05	210.13	43	6	5145.43	80.94
14	2	2441.36	55.75	44	6	5886.66	86.57
15	2	8975.42	106.90	45	6	90799.40	340.01
16	2	11838.99	122.78	46	6	6074.31	87.94
17	2	795.65	31.83	47	7	1565.02	44.64
18	3	68468.76	295.26	48	7	2927.38	61.05
19	3	6967.54	94.19	49	7	1559.39	44.56
20	3	1358.60	41.59	50	7	2563.33	57.13
21	3	11816.48	122.66	51	7	161193.50	453.03
22	3	31390.50	199.92	52	7	9001.69	107.06
23	3	3781.20	69.39	53	8	50037.53	252.41
24	3	2424.47	55.56	54	8	5905.42	86.71
25	3	1251.64	39.92	55	9	5361.23	82.62
26	4	91793.96	341.87	56	9	2221.81	53.19
27	4	3156.32	63.39	57	9	1855.88	48.61
28	4	1272.28	40.25	58	9	1238.51	39.71
29	4	53212.61	260.29	59	9	816.29	32.24
30	4	15381.87	139.95	60	9	791.89	31.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.1 ผลการวัดพื้นที่รูปทรงและคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของชิ้นงาน T713 (ต่อ)

ลำดับที่	รูปถ่ายที่	$A_p (\mu\text{m})^2$	$D_{\text{eq}} (\mu\text{m})$	ลำดับที่	รูปถ่ายที่	$A_p (\mu\text{m})^2$	$D_{\text{eq}} (\mu\text{m})$
61	10	63629.20	284.63	91	13	1249.77	39.89
62	10	1919.69	49.44	92	13	1204.73	39.17
63	10	54924.00	264.45	93	13	1865.27	48.73
64	10	6612.87	91.76	94	14	304989.70	623.16
65	10	1917.81	49.41	95	14	1124.04	37.83
66	10	1324.83	41.07	96	15	4115.22	72.39
67	11	18384.31	153.00	97	15	153509.10	442.10
68	11	4907.11	79.04	98	15	14098.33	133.98
69	11	921.37	34.25	99	15	5804.09	85.97
70	11	7678.74	98.88	100	15	21799.59	166.60
71	11	5372.49	82.71	101	16	14764.50	137.11
72	11	20624.88	162.05	102	16	34344.15	209.11
73	11	8277.35	102.66	103	16	1910.30	49.32
74	11	5117.28	80.72	104	16	2963.03	61.42
75	11	4539.31	76.02	105	16	551.70	26.50
76	12	20729.97	162.46	106	16	6971.29	94.21
77	12	5592.04	84.38	107	16	1369.86	41.76
78	12	10806.91	117.30	108	16	1225.37	39.50
79	12	49969.98	252.24	109	17	38937.89	222.66
80	12	2347.53	54.67	110	17	91820.23	341.92
81	12	1133.42	37.99	111	17	22826.05	170.48
82	12	1048.98	36.55	112	17	9356.35	109.15
83	12	1837.12	48.36	113	17	902.61	33.90
84	13	12734.10	127.33	114	18	239461.40	552.17
85	13	29104.90	192.50	115	18	4019.52	71.54
86	13	4867.71	78.73	116	19	21120.29	163.99
87	13	1020.83	36.05	117	19	145535.70	430.47
88	13	5141.68	80.91	118	19	30703.70	197.72
89	13	2139.24	52.19	119	20	109964.30	374.18
90	13	1711.39	46.68	120	20	6547.20	91.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.1 ผลการวัดพื้นที่รูปพรุนและคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของชิ้นงาน T713 (ต่อ)

ลำดับที่	รูปร่างที่	$A_p (\mu\text{m})^2$	$D_{\text{eq}} (\mu\text{m})$
121	20	7716.27	99.12
122	20	2512.67	56.56
123	20	15273.03	139.45
124	20	17658.10	149.94
125	20	16046.16	142.94
126	21	30617.38	197.44
127	21	65730.91	289.29
128	21	1692.63	46.42
129	22	441698.30	749.93
130	23	168551.30	463.26
131	23	115601.40	383.65
132	23	7089.51	95.01
133	23	1897.17	49.15
134	23	1152.19	38.30
135	24	51238.51	255.42
136	24	13252.02	129.90
137	24	55901.67	266.79
138	24	2174.89	52.62
139	25	35456.93	212.47
140	25	3559.77	67.32

ตาราง ผก.2 ผลการวัดพื้นที่รูปทรงและคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของชิ้นงาน T730

ลำดับที่	รูปถ่ายที่	$A_p (\mu\text{m})^2$	$D_{eq} (\mu\text{m})$	ลำดับที่	รูปถ่ายที่	$A_p (\mu\text{m})^2$	$D_{eq} (\mu\text{m})$
1	1	144100.20	428.34	31	7	707.45	30.01
2	2	21964.72	167.23	32	7	1414.90	42.44
3	2	14636.89	136.51	33	7	1572.53	44.75
4	2	2379.43	55.04	34	7	821.92	32.35
5	2	2244.32	53.46	35	7	1450.55	42.98
6	2	797.52	31.87	36	7	1602.55	45.17
7	3	6064.93	87.88	37	7	810.66	32.13
8	3	36070.56	214.30	38	7	2672.17	58.33
9	3	5946.71	87.01	39	7	1717.02	46.76
10	3	2182.40	52.71	40	7	673.67	29.29
11	3	1581.91	44.88	41	8	91953.46	342.17
12	3	11446.80	120.72	42	8	1148.43	38.24
13	4	36958.15	216.93	43	8	3779.32	69.37
14	4	28857.20	191.68	44	8	4811.41	78.27
15	4	12321.26	125.25	45	9	130694.30	407.93
16	4	1917.81	49.41	46	9	1086.51	37.19
17	5	248429.30	562.41	47	9	16121.22	143.27
18	6	193730.50	496.65	48	9	1651.34	45.85
19	6	2413.21	55.43	49	9	4417.34	75.00
20	6	654.91	28.88	50	9	3490.34	66.66
21	6	4042.03	71.74	51	10	12325.01	125.27
22	6	1889.66	49.05	52	10	37399.14	218.22
23	6	568.59	26.91	53	10	4250.33	73.56
24	6	758.12	31.07	54	10	1247.89	39.86
25	7	8074.69	101.40	55	10	716.83	30.21
26	7	928.88	34.39	56	11	4374.18	74.63
27	7	25676.49	180.81	57	11	14126.48	134.11
28	7	6626.01	91.85	58	11	2567.09	57.17
29	7	1114.66	37.67	59	11	823.79	32.39
30	7	953.27	34.84	60	11	3250.14	64.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.2 ผลการวัดพื้นที่รูปพรุนและคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของชิ้นงาน T730 (ต่อ)

ลำดับที่	รูปร่างที่	$A_p (\mu\text{m})^2$	$D_{eq} (\mu\text{m})$	ลำดับที่	รูปร่างที่	$A_p (\mu\text{m})^2$	$D_{eq} (\mu\text{m})$
61	11	30204.54	196.11	91	17	2728.47	58.94
62	11	47307.19	245.42	92	17	4062.68	71.92
63	11	63743.67	284.89	93	17	61707.64	280.30
64	12	4899.61	78.98	94	17	1063.99	36.81
65	12	5423.16	83.10	95	18	114865.80	382.43
66	12	4691.31	77.29	96	18	3090.64	62.73
67	12	2227.44	53.25	97	18	1641.96	45.72
68	13	198007.10	502.11	98	18	1174.70	38.67
69	13	1619.44	45.41	99	18	5665.23	84.93
70	13	628.64	28.29	100	19	2242.45	53.43
71	14	18215.43	152.29	101	19	2345.66	54.65
72	14	1551.89	44.45	102	19	3280.17	64.63
73	14	756.24	31.03	103	19	1330.46	41.16
74	14	4488.65	75.60	104	19	2009.76	50.59
75	14	12520.17	126.26	105	19	3024.96	62.06
76	14	18292.36	152.61	106	19	16284.48	143.99
77	14	4171.51	72.88	107	19	1880.28	48.93
78	14	2272.47	53.79	108	19	1000.19	35.69
79	15	197532.40	501.50	109	20	9962.47	112.63
80	15	3901.30	70.48	110	20	22375.68	168.79
81	15	2989.30	61.69	111	20	2690.94	58.53
82	15	2636.52	57.94	112	20	1407.39	42.33
83	15	630.51	28.33	113	20	2141.12	52.21
84	16	4180.90	72.96	114	20	1733.91	46.99
85	16	2985.55	61.65	115	20	38508.16	221.43
86	16	6975.04	94.24	116	20	52587.73	258.76
87	16	2099.83	51.71	117	20	7492.96	97.67
88	17	1319.20	40.98	118	20	1566.90	44.67
89	17	908.24	34.01	119	20	820.04	32.31
90	17	4753.24	77.79	120	21	111809.00	377.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.2 ผลการวัดพื้นที่รูปพรุนและคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของชิ้นงาน T730 (ต่อ)

ลำดับที่	รูปถ่ายที่	$A_p (\mu\text{m})^2$	$D_{eq} (\mu\text{m})$
121	21	5334.96	82.42
122	21	3933.20	70.77
123	21	953.27	34.84
124	21	900.73	33.87
125	21	3128.17	63.11
126	21	3824.36	69.78
127	22	6854.95	93.42
128	22	110452.20	375.01
129	22	4008.26	71.44
130	22	3304.56	64.87
131	22	2647.78	58.06
132	23	48140.36	247.58
133	23	15672.73	141.26
134	23	3413.40	65.92
135	24	68294.24	294.88
136	24	13100.02	129.15
137	24	1679.49	46.24
138	24	3375.87	65.56
139	24	1332.33	41.19
140	24	2024.77	50.77
141	25	41724.53	230.49
142	25	2884.22	60.60



ตาราง ผก.3 ผลการวัดพื้นที่รูปพรุนและคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของหินงาน T745

ลำดับที่	รูปถ่ายที่	$A_p$ ( $\mu\text{m}^2$ )	$D_{eq}$ ( $\mu\text{m}$ )	ลำดับที่	รูปถ่ายที่	$A_p$ ( $\mu\text{m}^2$ )	$D_{eq}$ ( $\mu\text{m}$ )
1	1	14899.61	137.73	31	4	2615.88	57.71
2	1	19939.95	159.34	32	4	25884.78	181.54
3	1	43993.24	236.67	33	4	2007.88	50.56
4	1	2366.30	54.89	34	4	2219.93	53.16
5	1	1185.96	38.86	35	4	14775.76	137.16
6	1	934.51	34.49	36	5	406558.50	719.48
7	2	22863.58	170.62	37	5	4661.29	77.04
8	2	15513.23	140.54	38	6	22131.73	167.87
9	2	1600.68	45.14	39	6	156115.60	445.84
10	2	2670.30	58.31	40	6	866.95	33.22
11	2	1998.50	50.44	41	7	28761.49	191.36
12	2	8219.18	102.30	42	7	29555.26	193.99
13	2	1225.37	39.50	43	7	3959.47	71.00
14	2	26729.22	184.48	44	7	942.02	34.63
15	2	32540.81	203.55	45	7	2591.48	57.44
16	2	1311.69	40.87	46	7	7956.47	100.65
17	2	1732.03	46.96	47	7	2278.10	53.86
18	2	559.20	26.68	48	8	91838.99	341.95
19	2	656.78	28.92	49	8	3246.39	64.29
20	3	49789.83	251.78	50	8	2525.80	56.71
21	3	3173.20	63.56	51	8	1411.15	42.39
22	3	11838.99	122.78	52	9	67230.25	292.58
23	3	31748.92	201.06	53	9	23571.03	173.24
24	3	3133.80	63.17	54	9	4342.28	74.36
25	3	4573.09	76.31	55	9	2054.80	51.15
26	3	90628.64	339.69	56	9	6175.64	88.67
27	4	89435.17	337.45	57	9	3062.49	62.44
28	4	8343.03	103.07	58	9	3670.48	68.36
29	4	1247.89	39.86	59	9	979.55	35.32
30	4	2341.90	54.61	60	9	14610.62	136.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.3 ผลการวัดพื้นที่รูพรุนและคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของชิ้นงาน T745 (ต่อ)

ลำดับที่	รูปร่างที่	$A_p (\mu\text{m})^2$	$D_{eq} (\mu\text{m})$	ลำดับที่	รูปร่างที่	$A_p (\mu\text{m})^2$	$D_{eq} (\mu\text{m})$
61	9	1154.06	38.33	93	17	310850.10	629.12
62	10	87025.71	332.87	94	17	3906.92	70.53
63	10	19495.21	157.55	95	17	973.92	35.21
64	10	5254.27	81.79	96	18	286560.30	604.04
65	10	1292.93	40.57	97	18	1698.26	46.50
66	10	6258.21	89.26	98	18	2178.65	52.67
67	10	1229.12	39.56	99	19	41797.71	230.69
68	11	375852.90	691.77	100	19	10705.57	116.75
69	12	20422.22	161.25	101	19	895.10	33.76
70	12	25293.68	179.46	102	20	20814.41	162.79
71	12	9088.01	107.57	103	20	3809.35	69.64
72	12	6913.12	93.82	104	20	19913.68	159.23
73	12	1655.10	45.91	105	20	5805.97	85.98
74	12	36866.20	216.66	106	20	6205.67	88.89
75	12	9011.07	107.11	107	20	40204.54	226.25
76	12	24098.33	175.17	108	20	2398.20	55.26
77	13	22979.92	171.05	109	20	2735.97	59.02
78	13	7125.16	95.25	110	21	96447.74	350.43
79	13	89628.45	337.81	111	21	34756.99	210.37
80	13	53107.52	260.04	112	21	10172.64	113.81
81	14	78087.82	315.32	113	21	840.68	32.72
82	14	41812.72	230.73	114	22	71583.79	301.90
83	14	8774.63	105.70	115	22	5575.16	84.25
84	15	39570.28	224.46	116	22	1319.20	40.98
85	15	17753.80	150.35	117	23	61696.38	280.28
86	15	1769.56	47.47	118	23	16590.35	145.34
87	15	4625.63	76.74	119	23	5456.93	83.35
88	15	2424.47	55.56	120	23	1067.74	36.87
89	16	184655.70	484.88	121	24	48609.50	248.78
90	16	4338.53	74.32	122	25	171262.90	466.97
91	16	3197.60	63.81	123	25	81508.73	322.15
92	16	810.66	32.13	124	25	1120.29	37.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.4 ผลการวัดพื้นที่รูพรุนและคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของหินงาน T772

ลำดับที่	รูปร่างที่	$A_p$ (mm) <sup>2</sup>	$D_{eq}$ (mm)	ลำดับที่	รูปร่างที่	$A_p$ (mm) <sup>2</sup>	$D_{eq}$ (mm)
1	1	139803.00	421.90	31	8	189474.60	491.17
2	1	7472.32	97.54	32	8	21670.11	166.11
3	1	973.92	35.21	33	8	7534.25	97.94
4	1	5862.26	86.39	34	8	2486.40	56.27
5	1	4528.05	75.93	35	8	880.09	33.47
6	1	1542.50	44.32	36	8	4665.04	77.07
7	1	2075.44	51.41	37	8	1017.08	35.99
8	1	139958.70	422.14	38	8	911.99	34.08
9	1	5091.01	80.51	39	8	540.44	26.23
10	2	357280.90	674.47	40	9	188842.20	490.35
11	2	14464.25	135.71	41	9	5426.91	83.12
12	2	7175.83	95.59	42	9	8834.68	106.06
13	3	5710.27	85.27	43	9	328.39	20.45
14	3	1174.70	38.67	44	9	136.99	13.21
15	3	536.69	26.14	45	9	2161.76	52.46
16	3	253.33	17.96	46	10	4561.83	76.21
17	3	1660.72	45.98	47	10	2887.97	60.64
18	3	1005.82	35.79	48	10	1371.74	41.79
19	4	72625.26	304.09	49	10	656.78	28.92
20	4	643.65	28.63	50	10	388.44	22.24
21	4	983.30	35.38	51	10	805.03	32.02
22	5	221878.40	531.51	52	10	403.45	22.66
23	5	8080.32	101.43	53	10	322.76	20.27
24	5	476.64	24.63	54	10	213.92	16.50
25	6	80433.48	320.02	55	11	65115.41	287.94
26	6	28192.91	189.46	56	11	54184.65	262.66
27	6	236363.30	548.59	57	12	132599.00	410.89
28	7	174627.50	471.53	58	12	1347.35	41.42
29	7	3647.96	68.15	59	12	7935.82	100.52
30	7	382.81	22.08	60	12	906.36	33.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผก.4 ผลการวัดพื้นที่รูปทรงและคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของชิ้นงาน T772 (ต่อ)

ลำดับที่	รูปถ่ายที่	$A_p$ (mm) <sup>2</sup>	$D_{eq}$ (mm)	ลำดับที่	รูปถ่ายที่	$A_p$ (mm) <sup>2</sup>	$D_{eq}$ (mm)
61	12	6641.02	91.95	92	18	6342.65	89.86
62	12	14670.67	136.67	93	18	1351.10	41.48
63	12	232.69	17.21	94	18	628.64	28.29
64	13	22812.91	170.43	95	19	54584.35	263.63
65	13	6858.70	93.45	96	19	5426.91	83.12
66	14	510958.90	806.58	97	19	20658.66	162.18
67	15	698.07	29.81	98	19	4145.24	72.65
68	15	63103.77	283.45	99	19	29453.93	193.65
69	15	26761.12	184.59	100	20	120247.70	391.29
70	15	9091.76	107.59	101	20	7806.34	99.70
71	15	10011.26	112.90	102	20	3507.23	66.82
72	15	865.08	33.19	103	21	78849.69	316.85
73	16	4122.73	72.45	104	21	63736.16	284.87
74	16	2043.54	51.01	105	21	1666.35	46.06
75	16	6963.78	94.16	106	22	8324.26	102.95
76	16	825.67	32.42	107	22	5481.33	83.54
77	16	694.31	29.73	108	22	41396.13	229.58
78	16	737.47	30.64	109	23	10416.59	115.16
79	16	3210.73	63.94	110	23	2994.93	61.75
80	16	5237.38	81.66	111	23	7211.48	95.82
81	16	6513.42	91.07	112	23	1383.00	41.96
82	16	3704.26	68.68	113	23	1257.27	40.01
83	16	797.52	31.87	114	23	20662.41	162.20
84	16	653.03	28.84	115	23	67070.74	292.23
85	16	439.11	23.65	116	23	1640.08	45.70
86	17	10600.49	116.18	117	24	250334.00	564.57
87	17	111499.30	376.78	118	25	145006.60	429.68
88	17	43439.67	235.18	119	25	3683.62	68.48
89	17	24062.68	175.04	120	25	2835.43	60.08
90	17	2066.05	51.29	121	25	2520.17	56.65
91	18	102835.40	361.85	122	25	2116.72	51.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้